

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES



TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ESTUDIO TERMOECONÓMICO PARA
LA IMPLANTACIÓN DE CENTRALES
GEOTÉRMICAS DE GENERACIÓN
ELÉCTRICA OPERADAS CON CO₂
SUPERCRÍTICO**

Autor:

Rubén Rupérez Delfa

Tutor:

Javier Villa Briongos

Leganés, Octubre de 2017

Resumen

El presente trabajo va a presentar un tipo de tecnología de generación eléctrica renovable a partir de energía geotérmica de la que no existen precedentes en ninguna parte del mundo. La tecnología geotérmica se encuentra aún en desarrollo, y pese a su enorme potencial, siendo una de las fuentes de energía renovables que más energía puede proporcionar al ser humano, hoy en día la explotación que se realiza, a nivel mundial, de los recursos geotérmicos es ínfima comparada con la energía que se podría llegar a extraer.

Se va a estudiar la viabilidad termodinámica, medioambiental y económica de una central geotérmica de generación eléctrica operada con CO₂ supercrítico en España. Para ello se va a analizar el estado del arte de la geotermia con el fin de determinar la tecnología más adecuado. Conjuntamente se tendrán en cuenta las características geológicas del país con el fin de determinar la localización más adecuada donde se puedan obtener los mejores resultados. Con estos datos, se podrá proceder al diseño del ciclo termodinámico, y de la central en cuestión, de la que habrá que estudiar su impacto medioambiental y su viabilidad económica que la permita competir en el mercado eléctrico español.

Se van a analizar, además, distintas alternativas del ciclo termodinámico, de forma que se puedan comparar las ventajas y desventajas entre ellos. Del mismo modo, se establecerán distintos escenarios económicos que podrían darse y de los cuales dependerá la viabilidad económica del proyecto.

Abstract

The current document is going to present a type of renewable electric generation technology from geothermal energy which has no precedents over the world. Geothermal technology is still under development, and despite its huge potential, being one of the renewable energy sources that can provide more energy, nowadays, the world exploitation of the geothermal resources is insignificant compared to the amount of energy that could be extracted.

This project is going to perform several studies to analyze the thermodynamic, environmental and economic viability of a geothermal power generation plant operated with supercritical CO₂ in Spain. For this purpose, the state of the art of geothermal energy is going to be studied in order to determine the most appropriate technology. The geological characteristics of the country are also going to be taken into account in order to determine the most appropriate location where the best results can be reached. With all this data, it will be possible to proceed with the design of the thermodynamic cycle, and the objective power plant. Then, the environmental impact and economic viability will be accomplished.

Different alternatives of the thermodynamic cycle will also be evaluated, so that the advantages and disadvantages between them can be compared. In the same way, different economic scenarios, on which the economic viability of the project will depend, will be analyzed.

Índice

1. Introducción	12
1.1. Motivación del proyecto	12
1.2. Objetivo	12
2. Energía geotérmica.....	13
2.1. Introducción a la energía geotérmica.....	13
2.2. Yacimientos geotérmicos. Tipos.....	16
2.3. La geotermia en el mundo	17
2.3.1. Europa.....	20
2.3.2. España.....	23
3. Tecnologías de aprovechamiento de los recursos geotérmicos.....	25
3.1. Tecnologías para usos directos del calor	25
3.1.1. Bomba de calor geotérmica	25
3.1.2. Sistemas de almacenamiento subterráneo de energía térmica (UTES)	27
3.2. Tecnologías de generación de energía eléctrica.....	28
3.2.1. Plantas de vapor seco.....	29
3.2.2. Plantas flash.....	30
3.2.3. Plantas de ciclo binario.....	32
3.2.4. Plantas de ciclo combinado (flash-binario)	32
3.2.5. Plantas geotérmicas híbridas	33
3.2.6. Coproducción con petróleo y gas	33
3.2.7. Sistemas geotérmicos estimulados (EGS)	33
3.2.7.1. CO ₂ supercrítico como fluido de trabajo.....	34
4. Diseño termodinámico de la planta.....	37
4.1. Selección de la tecnología y la localización	37
4.1.1. Gradiente geotérmico y temperatura del yacimiento.....	37
4.1.2. Profundidad y volumen del yacimiento.....	44
4.1.3. Permeabilidad del yacimiento	44
4.1.4. Conclusión.....	44
4.2. Selección del ciclo termodinámico de producción de potencia	48
4.2.1. Selección del fluido de trabajo	48
4.2.2. Ciclo Brayton simple	49
4.2.3. Mejoras del ciclo Brayton.....	51
4.2.3.1. Regeneración.....	51
4.2.3.2. Interenfriamiento	53

4.2.3.3.	Recalentamiento	56
4.2.3.4.	Regeneración, interenfriamiento y recalentamiento.....	58
4.3.	Reducción de la temperatura del yacimiento geotérmico	60
4.4.	Hipótesis de partida	69
4.5.	Software empleado para los cálculos del ciclo Brayton	72
4.6.	Resultados del ciclo termodinámico	73
4.6.1.	Resultados del ciclo Brayton simple	74
4.6.2.	Resultados del ciclo Brayton con regeneración.....	78
4.6.3.	Comparación de resultados.....	82
5.	Impacto ambiental	89
5.1.	Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	89
5.2.	Dióxido de azufre (SO ₂)	89
5.3.	Óxidos de nitrógeno (NO _x)	90
5.4.	Materia particulada (PM)	91
5.5.	Dióxido de carbono (CO ₂)	91
6.	Secuestro de CO ₂	94
7.	Sismicidad inducida	95
7.1.	Fracturación	95
7.2.	Inyección de fluido	95
8.	Estudio económico	97
8.1.	Costes.....	97
8.1.1.	Inversión inicial	97
8.1.2.	Costes de operación y mantenimiento	99
8.1.3.	Costes del CO ₂	101
8.2.	Precio de la electricidad generada.....	102
8.3.	Análisis de viabilidad.....	105
8.3.1.	VAN	108
8.3.2.	TIR.....	108
8.3.3.	Payback.....	108
8.3.4.	Resultados.....	109
8.4.	Propuestas de mejora	110
9.	Marco regulador	112
9.1.	Explotación del recurso	112
9.2.	Generación eléctrica.....	112
9.3.	Medio ambiente	114



10.	Conclusiones.....	115
11.	Referencias	117
	Anexo I: Cálculo del ciclo termodinámico, el refrigerador y la torre de refrigeración del ciclo Brayton simple.....	121
	Anexo II: Cálculo del ciclo termodinámico, el refrigerador y la torre de refrigeración del ciclo Brayton con regeneración	146
	Anexo III: Análisis económico de las distintas alternativas.....	171

Índice de Figuras

FIGURA 1: ESTRUCTURA INTERNA DE LA TIERRA. [1]	13
FIGURA 2: GRADIENTE GEOTÉRMICO NORMAL TERRESTRE. [3]	14
FIGURA 3: PLACAS TECTÓNICAS, VOLCANES ACTIVOS Y RIESGO SÍSMICO. [4].....	15
FIGURA 4: EVOLUCIÓN DE LA CAPACIDAD INSTALADA Y LA ENERGÍA TÉRMICA UTILIZADA DURANTE EL PERÍODO 1995-2010. [6]	18
FIGURA 5: USO DIRECTO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA A NIVEL MUNDIAL EN EL AÑO 2010. [6]	18
FIGURA 6: PRIMER GENERADOR ELÉCTRICO DE ORIGEN GEOTÉRMICO (1904) EN LARDERELLO (ITALIA). [7]	19
FIGURA 7: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA CAPACIDAD ELÉCTRICA INSTALADA (MW) Y DE LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA (GWh). [8]	19
FIGURA 8: DISTRIBUCIÓN GLOBAL DE LA CAPACIDAD INSTALADA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE ENERGÍA GEOTÉRMICA EN 2015. [8].....	21
FIGURA 9: MAPA DE RECURSOS GEOTÉRMICOS DE BAJA TEMPERATURA Y ZONAS DE POSIBLES APROVECHAMIENTOS. [5].....	23
FIGURA 10: MAPA DE RECURSOS GEOTÉRMICOS DE MEDIA Y ALTA TEMPERATURA Y POSIBLES SISTEMAS GEOTÉRMICOS ESTIMULADOS. [5]	24
FIGURA 11: BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA CON SONDEOS DE CAPTACIÓN DE AGUA (SISTEMA ABIERTO). [5]	26
FIGURA 12: SISTEMAS CERRADOS CON INTERCAMBIADOR DE CALOR HORIZONTAL. [5]...	26
FIGURA 13: SONDAS GEOTÉRMICAS. [5]	27
FIGURA 14: SISTEMA DE CIMENTACIÓN ENERGÉTICA. [10]	27
FIGURA 15: ESQUEMA DEL “CENTRE D4”, EL MAYOR CENTRO DE ALMACENAMIENTO DE CALOR SUBTERRÁNEO EN SUIZA. [7].....	28
FIGURA 16: ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA DE VAPOR SECO. [5]	30
FIGURA 17: ESQUEMAS DE FUNCIONAMIENTO DE PLANTAS FLASH (ARRIBA) Y DOBLE- FLASH (ABAJO). [5]	31
FIGURA 18: ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA DE CICLO BINARIO. [5]	32
FIGURA 19: ESQUEMA DE UN SISTEMA GEOTÉRMICO ESTIMULADO. [5]	34
FIGURA 20: DIAGRAMA DE FASES DEL AGUA. [11].....	35
FIGURA 21: DIAGRAMA DE FASES DEL CO ₂ . [12].....	35
FIGURA 22: MAPA DE LA DISTRIBUCIÓN DE FLUJO DE CALOR POR UNIDAD DE SUPERFICIE EN EL EXTERIOR. [15]	40
FIGURA 23: MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA ANUAL DE LA SUPERFICIE EN ESPAÑA. [16]	43
FIGURA 24: MAPA DE TEMPERATURAS A 3.500 M DE LA PENÍNSULA IBÉRICA. [15].....	45
FIGURA 25: MAPA DE TEMPERATURAS A 4.500 M DE LA PENÍNSULA IBÉRICA. [15].....	46
FIGURA 26: MAPA DE TEMPERATURAS A 5.500 M DE LA PENÍNSULA IBÉRICA. [15].....	47
FIGURA 27: COMPARACIÓN DE LAS TASAS DE EXTRACCIÓN DE CALOR EN UN YACIMIENTO CON UN POZO DE INYECCIÓN Y CUATRO POZOS DE PRODUCCIÓN USANDO AGUA Y CO ₂ . [17].....	48
FIGURA 28: COMPARACIÓN DEL FLUJO MÁSSICO EMPLEADO EN EL YACIMIENTO CON UN POZO DE INYECCIÓN Y CUATRO POZOS DE PRODUCCIÓN USANDO AGUA Y CO ₂ . [17]	49
FIGURA 29: ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CENTRAL GEOTÉRMICA CON UN CICLO BRAYTON SIMPLE. ELABORACIÓN PROPIA.	50

FIGURA 30: DIAGRAMA T-S DE UN CICLO BRAYTON SIMPLE. MODIFICADO DE [18].	50
FIGURA 31: ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CENTRAL GEOTÉRMICA CON UN CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN. ELABORACIÓN PROPIA.	52
FIGURA 32: DIAGRAMA T-S DE UN CICLO BRAYTON IDEAL CON REGENERACIÓN. MODIFICADO DE [19].	53
FIGURA 33: DIAGRAMA T-S DE UN CICLO BRAYTON IDEAL, SIN REGENERACIÓN, CON UNA ETAPA DE INTERENFRIAMIENTO. MODIFICADO DE [20].	54
FIGURA 34: DIAGRAMA T-S DE UN CICLO BRAYTON IDEAL CON REGENERACIÓN Y UNA ETAPA DE INTERENFRIAMIENTO. MODIFICADO DE [19].	54
FIGURA 35: ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CENTRAL GEOTÉRMICA CON UN CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN Y UNA ETAPA DE INTERENFRIAMIENTO. ELABORACIÓN PROPIA.	55
FIGURA 36: DIAGRAMA T-S DE UN CICLO BRAYTON IDEAL, SIN REGENERACIÓN, CON UNA ETAPA DE RECALENTAMIENTO. MODIFICADO DE [19].	56
FIGURA 37: ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CENTRAL GEOTÉRMICA CON UN CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN Y UNA ETAPA DE RECALENTAMIENTO. ELABORACIÓN PROPIA.	57
FIGURA 38: DIAGRAMA T-S DE UN CICLO BRAYTON IDEAL CON REGENERACIÓN Y UNA ETAPA DE RECALENTAMIENTO. MODIFICADO DE [19].	58
FIGURA 39: ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CENTRAL GEOTÉRMICA CON UN CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN, UNA ETAPA DE INTERENFRIAMIENTO Y UNA ETAPA DE RECALENTAMIENTO. ELABORACIÓN PROPIA.	59
FIGURA 40: DIAGRAMA T-S DE UN CICLO BRAYTON IDEAL CON REGENERACIÓN, UNA ETAPA DE INTERENFRIAMIENTO Y UNA ETAPA DE RECALENTAMIENTO. [19].	60
FIGURA 41: REPRESENTACIÓN DEL ÁREA DEL YACIMIENTO DE REFERENCIA PARA LA SIMULACIÓN. EL MALLADO ESTÁ REALIZADO EN 1/8 DE LA SUPERFICIE. [21].	61
FIGURA 42: PERFILES DE FLUJO MÁSSICO, DE CO ₂ PARA LOS DISTINTOS NIVELES DE PRESIÓN DE YACIMIENTO INDICADOS, Y DE AGUA, OBTENIDOS USANDO GA- TOUGH2 (ARRIBA) Y POR PRUESS (ABAJO) [22]. MODIFICADO DE [21].	63
FIGURA 43: PERFILES DE POTENCIA EXTRAÍDA, POR EL CO ₂ PARA LOS DISTINTOS NIVELES DE PRESIÓN DE YACIMIENTO INDICADOS, Y POR EL AGUA, OBTENIDOS USANDO GA- TOUGH2 (ARRIBA) Y POR PRUESS (ABAJO) [22]. MODIFICADO DE [21].	64
FIGURA 44: PERFIL DE TEMPERATURAS DE PRODUCCIÓN A 200 BAR. [21].	65
FIGURA 45: MOVILIDAD DEL CO ₂ (ARRIBA) Y DEL AGUA (ABAJO) EN UNIDADES DE 10 ⁶ SM ⁻² . [21].	66
FIGURA 46: ENTALPÍA ESPECÍFICA DEL CO ₂ (ARRIBA) Y DEL AGUA (ABAJO) EN KJ/KG. [21].	67
FIGURA 47: PERFIL ÓPTIMO DE INYECCIÓN. [21].	68
FIGURA 48: ESQUEMA DE LA CENTRAL TRABAJANDO CON UN CICLO BRAYTON SIMPLE DURANTE EL PRIMER PERIODO DE FUNCIONAMIENTO, HECHO USANDO EL PROGRAMA THERMOFLEX. ELABORACIÓN PROPIA.	76
FIGURA 49: ESQUEMA DE LA CENTRAL TRABAJANDO CON UN CICLO BRAYTON SIMPLE DURANTE EL SEGUNDO PERIODO DE FUNCIONAMIENTO, HECHO USANDO EL PROGRAMA THERMOFLEX. ELABORACIÓN PROPIA.	77
FIGURA 50: ESQUEMA DE LA CENTRAL TRABAJANDO CON UN CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN DURANTE EL PRIMER PERIODO DE FUNCIONAMIENTO, HECHO USANDO EL PROGRAMA THERMOFLEX. ELABORACIÓN PROPIA.	80

FIGURA 51: ESQUEMA DE LA CENTRAL TRABAJANDO CON UN CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN DURANTE EL SEGUNDO PERIODO DE FUNCIONAMIENTO, HECHO USANDO EL PROGRAMA THERMOFLEX. ELABORACIÓN PROPIA.	81
FIGURA 52: ESQUEMA DE LA CENTRAL TRABAJANDO CON UN CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN E INTERENFRIAMIENTO DURANTE EL PRIMER PERIODO DE FUNCIONAMIENTO, HECHO USANDO EL PROGRAMA THERMOFLEX. ELABORACIÓN PROPIA.	83
FIGURA 53: ESQUEMA DE LA CENTRAL TRABAJANDO CON UN CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN E INTERENFRIAMIENTO DURANTE EL SEGUNDO PERIODO DE FUNCIONAMIENTO, HECHO USANDO EL PROGRAMA THERMOFLEX. ELABORACIÓN PROPIA.	84
FIGURA 54: ESQUEMA DE LA CENTRAL TRABAJANDO CON UN CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN Y RECALENTAMIENTO DURANTE EL PRIMER PERIODO DE FUNCIONAMIENTO, HECHO USANDO EL PROGRAMA THERMOFLEX. ELABORACIÓN PROPIA.	85
FIGURA 55: ESQUEMA DE LA CENTRAL TRABAJANDO CON UN CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN Y RECALENTAMIENTO DURANTE EL SEGUNDO PERIODO DE FUNCIONAMIENTO, HECHO USANDO EL PROGRAMA THERMOFLEX. ELABORACIÓN PROPIA.	86
FIGURA 56: ESQUEMA DE LA CENTRAL TRABAJANDO CON UN CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN, INTERENFRIAMIENTO Y RECALENTAMIENTO DURANTE EL PRIMER PERIODO DE FUNCIONAMIENTO, HECHO USANDO EL PROGRAMA THERMOFLEX. ELABORACIÓN PROPIA.	87
FIGURA 57: ESQUEMA DE LA CENTRAL TRABAJANDO CON UN CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN, INTERENFRIAMIENTO Y RECALENTAMIENTO DURANTE EL SEGUNDO PERIODO DE FUNCIONAMIENTO, HECHO USANDO EL PROGRAMA THERMOFLEX. ELABORACIÓN PROPIA.	88
FIGURA 58: COMPARACIÓN DE EMISIONES DE SO ₂ . [23]	89
FIGURA 59: COMPARACIÓN DE PEKÍN EN UN DÍA DESPUÉS DE LA LLUVIA (IZQUIERDA) Y UN DÍA SOLEADO CON SMOG (DERECHA). [24]	90
FIGURA 60: COMPARACIÓN DE EMISIONES DE NO _x . [23]	90
FIGURA 61: COMPARACIÓN DE EMISIONES DE MATERIA PARTICULADA. [23]	91
FIGURA 62: CURVA KEELING. CONCENTRACIÓN DE CO ₂ MEDIDAS EN EL OBSERVATORIO DE MAUNA LOA (HAWÁI). [25]	92
FIGURA 63: COMPARACIÓN DE EMISIONES DE CO ₂ . [23]	93
FIGURA 64: COSTES DE PERFORACIÓN EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD (2 POZOS, COSTES DE MOVILIZACIÓN Y PERFORACIÓN, REVESTIMIENTO INCLUIDO). [28]	97
FIGURA 65: FACTOR DE CAPACIDAD MENSUAL DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA. [34]	100
FIGURA 66: DESARROLLO DE UN CAMPO GEOTÉRMICO PARA UNA UNIDAD DE APROXIMADAMENTE 50 MW. [30]	103
FIGURA 67: COSTES NIVELADOS DE LA ENERGÍA PARA DISTINTAS TECNOLOGÍAS Y EN FUNCIÓN DE SI SON O NO MIEMBROS DE LA OCDE. [36]	105
FIGURA 68: DISTRIBUCIÓN (ARRIBA) Y VALORES (ABAJO) DEL PRECIO MEDIO ANUAL DE LA DEMANDA NACIONAL PARA EL PERIODO 2009-2016. [37]	106



FIGURA 69: PROGRESIÓN DEL CALOR REQUERIDO DE FUENTES EXTERNAS, ÁREA DEL INTERCAMBIADOR Y COSTE DEL INTERCAMBIADOR CON EL VALOR DE LA DIFERENCIA MÍNIMA DE TEMPERATURA (PINCH). [38]	111
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Índice de Tablas

TABLA 1: USO DIRECTO DEL CALOR GEOTÉRMICO POR CONTINENTES EN 2015. [9]	22
TABLA 2: DISTRIBUCIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PROCEDENTE DE RECURSOS GEOTÉRMICOS EN 2015. [8]	22
TABLA 3: YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS DE ALTA TEMPERATURA CON PRESENCIA DE AGUA EN ESPAÑA. [14]	39
TABLA 4: SUPERFICIE, SUPERFICIE RELATIVA, FLUJO DE CALOR POR UNIDAD DE SUPERFICIE, PORCENTAJE DE LA SUPERFICIE CON DATOS DE TEMPERATURAS A 2 KM DE PROFUNDIDAD Y FACTOR DE ZONAS NATURALES PROTEGIDAS POR REGIONES DE LA PENÍNSULA IBÉRICA. [15]	41
TABLA 5: PARÁMETROS DEL YACIMIENTO DE REFERENCIA USADOS EN LA SIMULACIÓN. MODIFICADO DE [22]	62
TABLA 6: CARACTERÍSTICAS DEL YACIMIENTO GEOTÉRMICO. ELABORACIÓN PROPIA.....	69
TABLA 7: CONDICIONES DE DISEÑO DEL CICLO TERMODINÁMICO. ELABORACIÓN PROPIA.	70
TABLA 8: CONDICIONES DE DISEÑO DEL REFRIGERADOR. ELABORACIÓN PROPIA.	70
TABLA 9: CONDICIONES DE DISEÑO DE LA TORRE DE REFRIGERACIÓN. ELABORACIÓN PROPIA.	71
TABLA 10: VALORES DE FLUJO MÁSSICO DE CO ₂ EN EL CICLO BRAYTON SIMPLE PARA AMBOS PERIODOS DE FUNCIONAMIENTO. ELABORACIÓN PROPIA	72
TABLA 11: VALORES DE FLUJO MÁSSICO DE CO ₂ EN EL CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN PARA AMBOS PERIODOS DE FUNCIONAMIENTO. ELABORACIÓN PROPIA	72
TABLA 12: PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DE TRABAJO Y REFRIGERACIÓN EN LOS DISTINTOS PUNTOS DEL CICLO BRAYTON SIMPLE DURANTE EL PRIMER PERIODO DE FUNCIONAMIENTO. ELABORACIÓN PROPIA.	75
TABLA 13: PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DE TRABAJO Y REFRIGERACIÓN EN LOS DISTINTOS PUNTOS DEL CICLO BRAYTON SIMPLE DURANTE EL SEGUNDO PERIODO DE FUNCIONAMIENTO. ELABORACIÓN PROPIA.	75
TABLA 14: PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DE TRABAJO Y REFRIGERACIÓN EN LOS DISTINTOS PUNTOS DEL CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN DURANTE EL PRIMER PERIODO DE FUNCIONAMIENTO. ELABORACIÓN PROPIA.	79
TABLA 15: PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DE TRABAJO Y REFRIGERACIÓN EN LOS DISTINTOS PUNTOS DEL CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN DURANTE EL SEGUNDO PERIODO DE FUNCIONAMIENTO. ELABORACIÓN PROPIA	79
TABLA 16: COMPARATIVA DE CAPACIDAD DE SECUESTRO DE CO ₂ . ELABORACIÓN PROPIA	94
TABLA 17: COSTES DE LA INVERSIÓN INICIAL DEL PROYECTO. ELABORACIÓN PROPIA. ...	99
TABLA 18: COSTE ANUAL DE CO ₂ EN M€/AÑO. ELABORACIÓN PROPIA	101
TABLA 19: COSTES NIVELADOS DE LA ENERGÍA PARA LAS DOS CONFIGURACIONES (ESCENARIO 1). ELABORACIÓN PROPIA.	104
TABLA 20: COSTES NIVELADOS DE LA ENERGÍA PARA LAS DOS CONFIGURACIONES (ESCENARIO 2). ELABORACIÓN PROPIA.	104
TABLA 21: FLUJOS DE CAJA PARA LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS (ESCENARIO 1). ELABORACIÓN PROPIA.	107



TABLA 22: FLUJOS DE CAJA PARA LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS (ESCENARIO 2).	
ELABORACIÓN PROPIA.	107
TABLA 23: INDICADORES DE VIABILIDAD ECONÓMICA PARA LAS DISTINTAS	
ALTERNATIVAS. ELABORACIÓN PROPIA.	109
TABLA 24: RATIOS ESTIMADOS DE GENERACIÓN DE EMPLEO EN EEUU PARA LA	
GEOTERMIA Y EL GAS NATURAL. [40]	116

1. Introducción

En el primer apartado de este proyecto se van a identificar las claves sobre las que basar este trabajo, de forma que queden claros tanto la motivación como el objetivo del proyecto en torno a los cuales se va a producir su desarrollo.

1.1. Motivación del proyecto

En nuestra sociedad, el uso de fuentes de energía renovables está ampliamente aceptado. La difusión a través de los medios de comunicación de los problemas derivados del uso de combustibles fósiles (agotamiento, difícil regeneración, emisión de contaminantes,...), y los derivados de sus emisiones, como pueden ser problemas de salud o el aumento del efecto invernadero, han hecho que la población esté cada vez más concienciada de la necesidad de implantar sistemas de generación de energía eléctrica que sean capaces de satisfacer las necesidades energéticas mundiales a partir de otras fuentes de energía. En este trabajo se va a presentar la energía geotérmica como una fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles capaz de solucionar estos problemas.

En primer lugar, las emisiones de gases contaminantes que se producen en una central geotérmica son debidos, principalmente, a los gases que se encuentran atrapados bajo la corteza terrestre, que son liberados en su perforación. Estas emisiones, comparadas con las que se producen en centrales térmicas convencionales, son insignificantes. Además, existen sistemas de captación que son capaces de reducir estas emisiones en más de un 90%.

Por otro lado, la propuesta más innovadora de este proyecto es la utilización de CO₂, un gas de efecto invernadero, como fluido de trabajo. Se va a comprobar que, durante la operación de la central que se quiere diseñar, parte de este CO₂ queda atrapado (secuestrado) bajo el subsuelo, con lo que pueden retirarse de la atmósfera grandes cantidades del mismo, lo que supone un gran beneficio para el medioambiente.

1.2. Objetivo

El objetivo final de este trabajo es el diseño termodinámico del ciclo de producción de potencia de una central de generación eléctrica que utilice una fuente de calor geotérmica.

Para ello, se realizará una breve descripción de la energía geotérmica, su origen y los yacimientos de donde puede obtenerse. Además, se analizará el estado actual de implantación de este tipo de energía en el mundo, tratando con más detalle el caso de Europa, y ahondando más en el caso de España. Se expondrá, también, el marco regulador y la legislación vigente a los que está sujeto este tipo de proyectos.

Seguidamente, con el fin de seleccionar la tecnología de generación eléctrica más adecuada, se va a analizar el estado del arte de la tecnología geotérmica, donde además se presentará el CO₂ como una alternativa al agua como fluido de trabajo.

Por último, se realizará el diseño termodinámico de la central, donde se propondrán las hipótesis iniciales para el diseño, se justificará la elección de la localización de la planta y se analizará el ciclo termodinámico resultante. Una vez hecho esto, se evaluará el impacto sobre el medioambiente y la viabilidad económica del proyecto.

2. Energía geotérmica

En el segundo apartado, se va a hacer una presentación de la energía geotérmica, su origen, los distintos tipos de yacimientos de donde puede extraerse, y el uso actual de la misma a tres niveles: mundial, europeo y a nivel español.

2.1. Introducción a la energía geotérmica

La energía geotérmica es la energía que se obtiene de aprovechar el calor almacenado en el interior de la Tierra. Si se analiza la estructura interna de la Tierra (FIGURA 1), esta presenta básicamente tres capas concéntricas. La corteza, que es la capa más externa y visible desde el exterior está formada fundamentalmente por silicatos de aluminio y magnesio. Tiene un espesor que varía entre 6-12 km para la corteza oceánica y 25-70 km para la corteza continental. La temperatura, dependiendo de la profundidad, varía entre los 15-20°C de la superficie, y los 800-1.000°C de la zona que está en contacto con el manto. El manto está compuesto fundamentalmente por silicatos de hierro y magnesio en un estado semifundido que permite que estos fluyan. Presenta un espesor de 2.900 km, y en su contacto con el núcleo alcanza temperaturas de 4.000°C. Por último, el núcleo es la capa más interna, con unos 3.500 km de espesor. Está compuesto principalmente por hierro y níquel, fundido en su capa más externa y sólido en la más interna, donde se alcanzan temperaturas superiores a los 6.000°C.

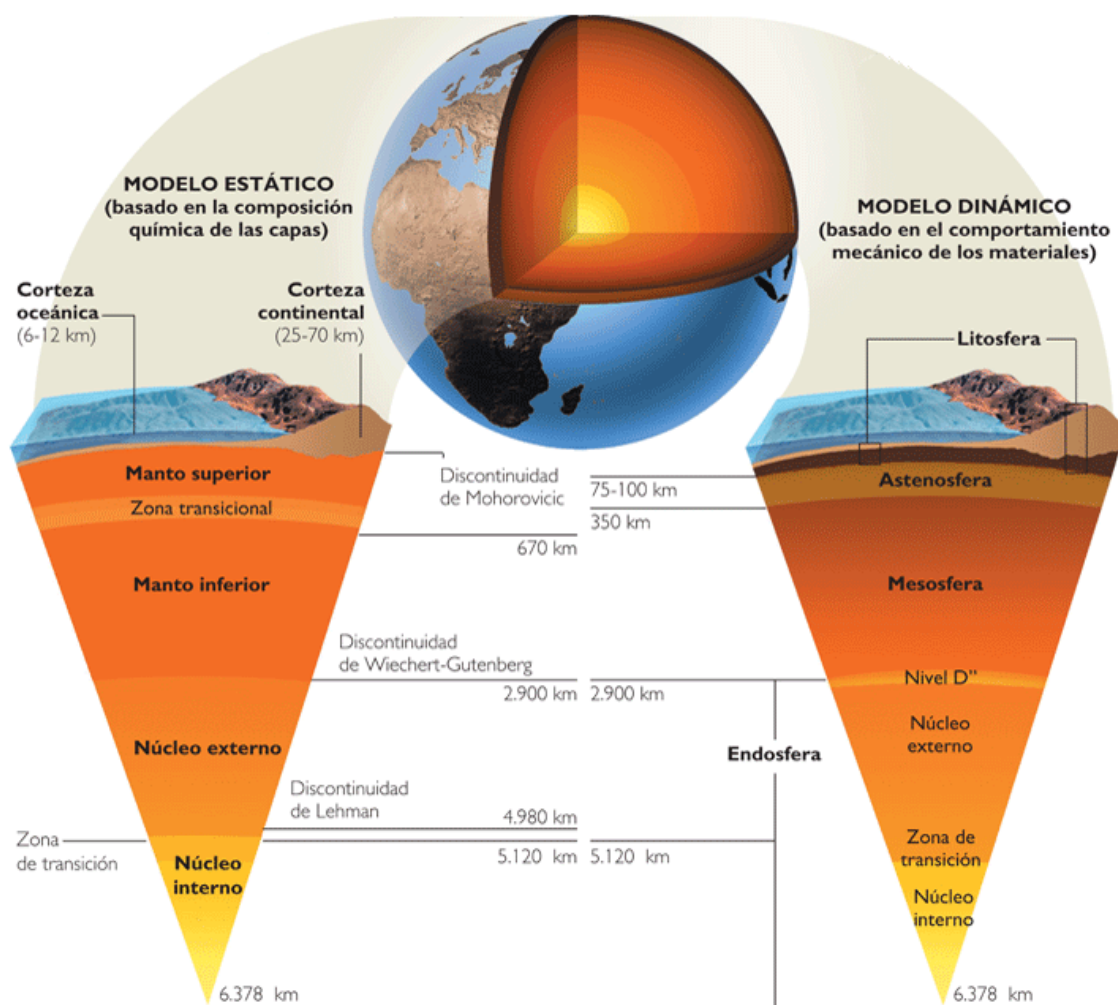


Figura 1: Estructura interna de la Tierra. [1]

A partir de los datos del párrafo anterior, se puede comprobar como la distribución de la temperatura terrestre con la profundidad no es lineal. No obstante, en la corteza el flujo medio de calor registrado es del orden de $62,7 \text{ mW/m}^2$, lo que da lugar a gradientes de temperatura de 3°C cada 100 m, generando un perfil de temperaturas en función de la profundidad como el mostrado en la FIGURA 2. Este flujo de calor no es igual en toda la corteza terrestre, sino que en determinados puntos el flujo de calor alcanza valores de hasta 10 y 20 veces el flujo de calor medio, generando gradientes de temperatura de $15\text{-}30^\circ\text{C}$ cada 100 m [2].

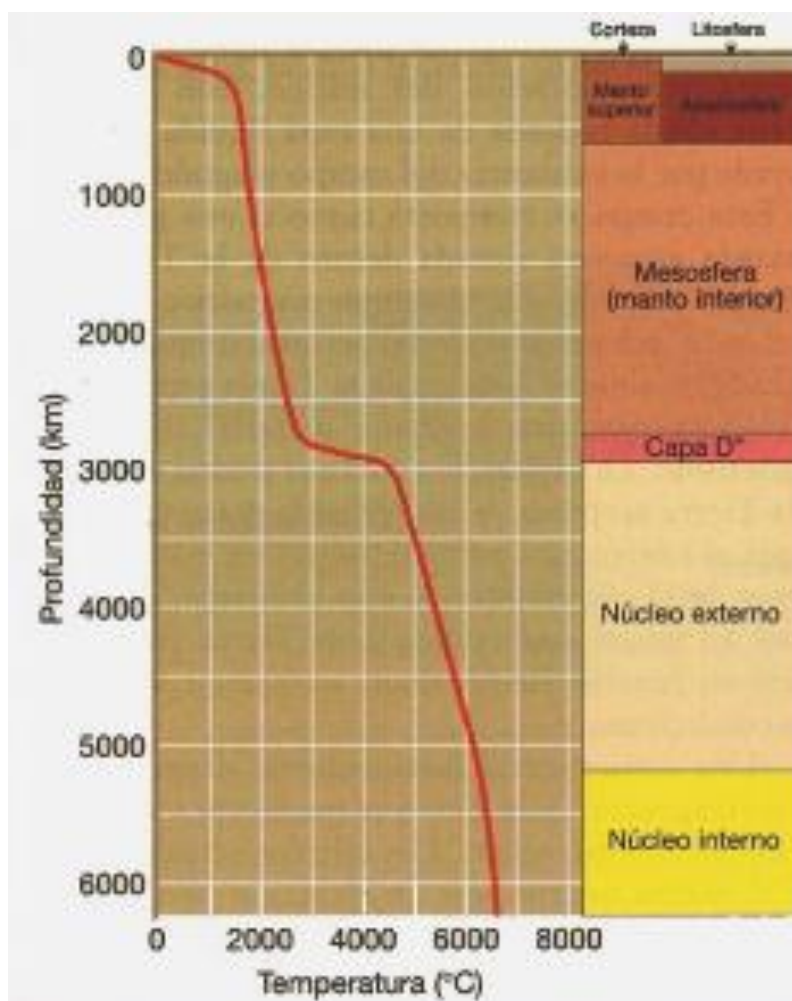


Figura 2: Gradiente geotérmico normal terrestre. [3]

Para poder explicar la existencia de este cambio tan grande en el gradiente geotérmico, se debe hacer uso de la teoría de la tectónica de placas. La litosfera terrestre está compuesta por diferentes placas tectónicas (FIGURA 3), grandes masas de roca sólida que se comportan como un bloque rígido y que se desplazan sobre la parte superior del manto (astenosfera). Este desplazamiento se debe a las corrientes de convección que se producen en el manto. Materiales fundidos de la parte inferior del manto ascienden hasta enfriarse en la parte superior, con lo que vuelven a descender, repitiéndose este proceso de forma continua. Este proceso, no solo origina el movimiento de dichas placas, sino que es también el detonante de las erupciones volcánicas y terremotos que ocurren en el planeta. La mayor parte de estos se producen en los bordes de placa, y es en estas zonas donde se encuentran los mayores gradientes geotérmicos.

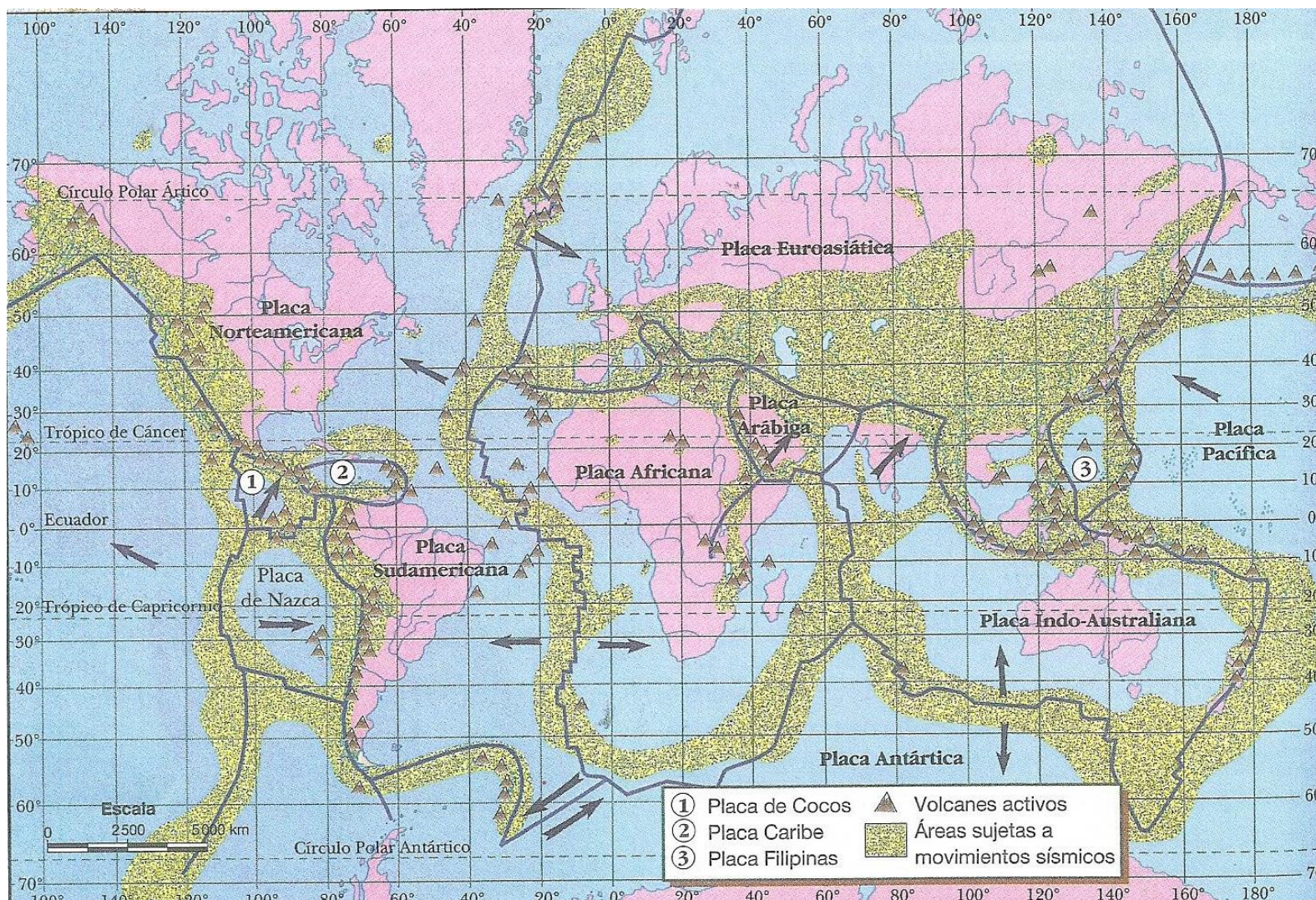


Figura 3: Placas tectónicas, volcanes activos y riesgo sísmico. [4]

El calor interno de la Tierra tiene su origen en distintos fenómenos: los movimientos diferenciales entre las capas que constituyen nuestro planeta (especialmente entre el manto y el núcleo), el calor inicial que se liberó durante la formación del planeta, la desintegración de isótopos radioactivos (principalmente uranio 235, uranio 238, torio 282 y potasio 40) y el calor latente de cristalización del núcleo externo.

2.2. Yacimientos geotérmicos. Tipos

Se define como recurso geotérmico a la parte de la energía geotérmica que puede ser aprovechada por el hombre de forma tanto técnica como económicamente viable. La definición se extiende tanto a los recursos que son aprovechables en la actualidad como a los que lo serán en un futuro próximo. El espacio físico donde se encuentran dichos recursos geotérmicos se denomina como yacimiento geotérmico.

En este apartado, se realizará una clasificación de estos yacimientos en función de la temperatura del recurso geotérmico que contienen.

- **Yacimientos geotérmicos de alta temperatura:** En ellos el fluido se encuentra en condiciones de presión y temperatura altas (superiores a 150°C). Estas condiciones se deben a que todos ellos se encuentran en zonas con un gradiente geotérmico elevado a 1.500-3.000 m de profundidad. En general, requieren de la existencia de una fuente de calor (magma) a 5-10 km de la superficie y un acuífero rodeado de roca impermeable que mantenga el agua a presión en su interior, y que debe presentar alguna zona permeable que permita su recarga de agua.
- **Yacimientos geotérmicos de media temperatura:** El fluido de estos yacimientos está a temperaturas entre 100°C y 150°C. Estos yacimientos se encuentran en: cuencas sedimentarias a 2.000-4.000 m de profundidad, zonas donde la litosfera es más delgada, zonas con grandes concentraciones de isótopos radioactivos, o en yacimientos con características similares a los de alta temperatura, pero a 1.000 m de profundidad.
- **Yacimientos geotérmicos de baja temperatura:** La temperatura del recurso geotérmico que contienen oscila entre 30°C y 100°C. Requieren la existencia de formaciones geológicas permeables a profundidades de 1.500-2.500 m. Los de mayor temperatura se encuentran en cuencas sedimentarias jóvenes, donde el calor obtenido de la descomposición de isótopos radioactivos es mayor.
- **Yacimientos geotérmicos de muy baja temperatura:** Se denominan así a aquellos yacimientos geotérmicos en los que se alcanzan temperaturas inferiores a 30°C. A partir de 10-15 m de profundidad, el terreno es capaz de mantener una temperatura relativamente constante y ligeramente superior a la de la superficie. A estas profundidades, la temperatura depende del clima, la vegetación o las características geológicas del terreno. Sin embargo, a partir de los 15 m de profundidad, la dependencia funcional de la temperatura pasa únicamente a depender de las características geológicas y geotérmicas de la zona, y es a partir de los 20 m de profundidad cuando esta temperatura comienza a aumentar, alcanzando a los 500 m los 25-30°C en la mayor parte del planeta. Por ello, prácticamente la totalidad de la corteza terrestre se podría considerar como un yacimiento de este tipo.

Además, dentro de los yacimientos de alta temperatura, existen otros tipos, que, por sus características, no se incluyen entre los yacimientos convencionales:

- **Yacimientos geotérmicos de roca caliente seca (HDR: *Hot Dry Rock*):** Se trata de yacimientos artificiales creados por el hombre, en materiales geológicos de escasa o nula permeabilidad y porosidad, con condiciones de alta temperatura, debido a la proximidad de estos a cámaras magmáticas, y en ausencia de fluido en su interior. Estos yacimientos se crean con la misma técnica que se utiliza frecuentemente en la producción de petróleo o gas natural, la llamada fracturación hidráulica, que consiste en inyectar un gran volumen de agua a presión elevada a través de un pozo. Con este método se persigue crear una red de fracturas en la roca por donde pueda circular posteriormente el fluido que se desee calentar. Los resultados obtenidos en la creación de yacimientos geotérmicos de roca caliente seca han abierto la posibilidad de aplicar las técnicas de fracturación indicadas a yacimientos de baja permeabilidad que ya se estén explotando, con objeto de incrementar las reservas geotérmicas y la productividad.
- **Yacimientos geotérmicos supercríticos:** Se trata de yacimientos situados en zonas volcánicas y calentados por el magma subsuperficial, que, debido a las condiciones termodinámicas, permitirían la producción de electricidad, e incluso de hidrógeno. Su investigación se viene desarrollando en los últimos tiempos, ya que la tecnología necesaria debe garantizar que los equipos puedan funcionar grandes periodos de tiempo a temperaturas muy elevadas.
- **Yacimientos geotérmicos geopresurizados:** Se trata de yacimientos sellados para el intercambio con las rocas circundantes en los que el agua contenida se encuentra a presiones muy elevadas. Además, suelen presentar importantes cantidades de gas natural disuelto en el agua, lo que le confiere cierto potencial energético adicional. Han sido descubiertos a partir de explotaciones petrolíferas a profundidades superiores a 6.000 m, con lo que el agua se encuentra a temperaturas superiores a los 150°C. Sin embargo, actualmente no son explotados debido a que no son económicamente viables, aunque podrían llegar a convertirse en una importante fuente de gas natural y energía geotérmica.

2.3. La geotermia en el mundo

En la actualidad, el calor procedente del interior de la Tierra se aprovecha mayoritariamente de forma directa como fuente de calor, siendo, por lo tanto, los yacimientos geotérmicos de baja y muy baja temperatura, los de mayor explotación. El uso industrial y a gran escala de esta energía comienza a producirse en el siglo XX, cuando Islandia comienza a calefactar invernaderos en los años 20 con energía geotérmica. En 1930, se establece en Reikiavik el primer sistema de calefacción urbana que suministraría calor a 70 viviendas. A partir de la década de los 50, comenzó a extenderse el uso de esta energía por todo el mundo, con lo que, a finales del año 2009, 78 países hacían uso de esta energía, con una capacidad instalada de 50.583 MWt. Esto representa un crecimiento del 78,9% con respecto al año 2005, lo que supone un incremento anual del 12,33% con un factor de capacidad de 0,27 (equivalente a 98,55 días de operación a plena carga al año) [5].

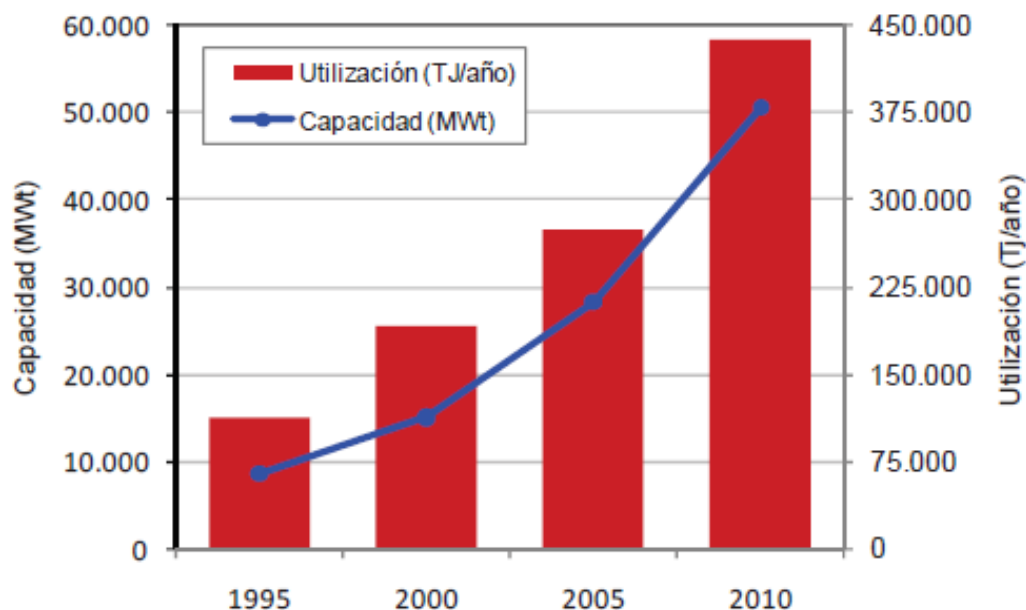


Figura 4: Evolución de la capacidad instalada y la energía térmica utilizada durante el período 1995-2010. [6]

Se utilizaron 121.696 GWh/año, lo que supone un 60,2% más que en 2005 (9,9% de incremento anual), consiguiendo un ahorro de 307,8 millones de barriles de petróleo y evitando la emisión de 148,2 millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera [5]. La distribución de los usos térmicos de esta energía se muestra en la siguiente figura:

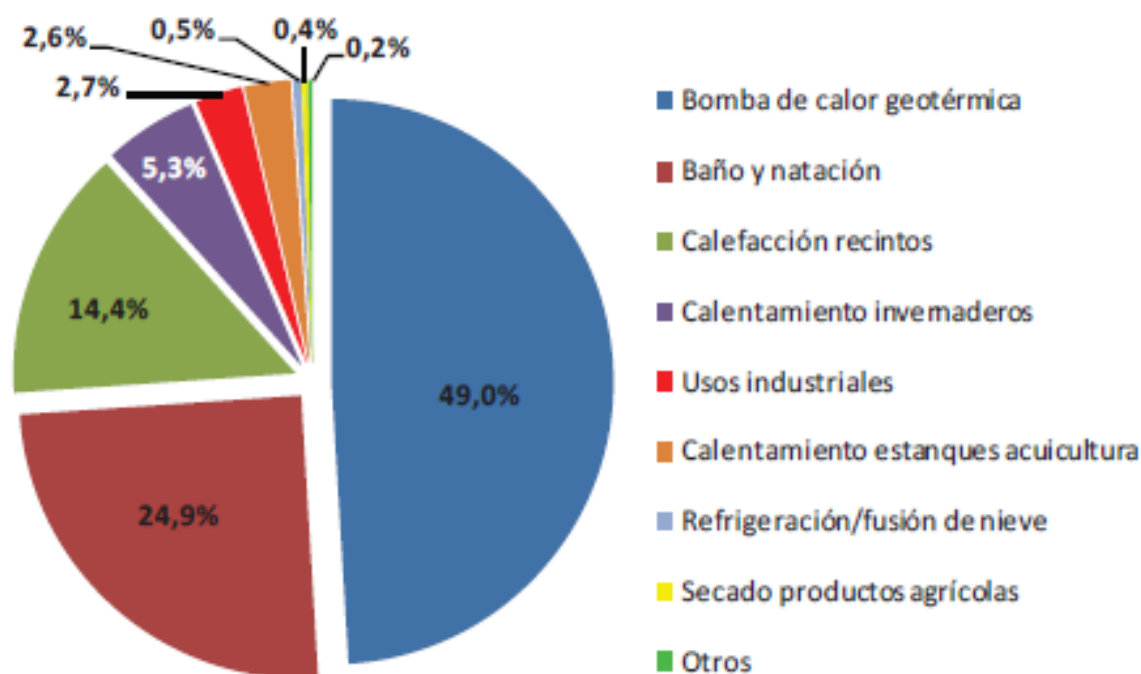


Figura 5: Uso directo de la energía geotérmica a nivel mundial en el año 2010. [6]

En cuanto al uso de la energía geotérmica en la producción eléctrica, el primer generador eléctrico geotérmico se puso en funcionamiento en Larderello (Italia) en 1913, con una unidad de 250 kW, aunque desde 1904 ya se habían realizado pruebas con generadores de menor tamaño y potencia. A partir de los años 20, otros países como Japón o EE.UU. comenzaron a construir generadores experimentales, pero Italia siguió siendo el único país productor de electricidad geotérmica a escala industrial del mundo hasta 1958.



Figura 6: Primer generador eléctrico de origen geotérmico (1904) en Larderello (Italia). [7]

La capacidad instalada alcanzó en 2015 los 12.729 MWe, lo que significa un aumento del 16,83% respecto al año 2010. Se espera además que para el año 2020, esta cifra supere los 20.000 MWe.

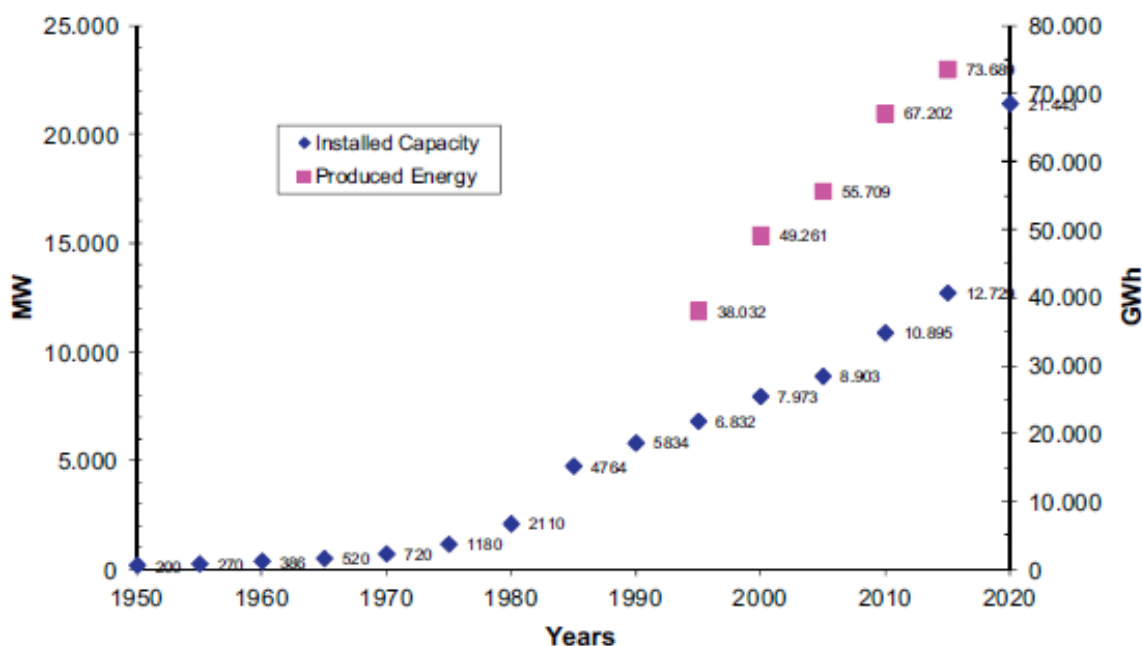


Figura 7: Evolución temporal de la capacidad eléctrica instalada (MW) y de la producción eléctrica (GWh). [8]

En la FIGURA 8 se muestra la distribución de la capacidad instalada a nivel global en el año 2015, donde se puede apreciar como EE.UU. y Filipinas se encuentran a la cabeza del mundo en capacidad de generación eléctrica con energía geotérmica.

EE.UU., con una capacidad instalada de 3.450 MWe, produce al año 16.600 GWh. En el estado de California se encuentra la instalación geotérmica más grande del mundo: el complejo geotérmico The Geysers. El complejo cuenta con 18 plantas geotérmicas en operación, 13 de ellas propiedad de Calpine Corporation, que extraen vapor de agua sobrecalentado de más de 350 pozos y generan una potencia de 835 MWe, de un total de 1.584 MWe de potencia instalada.

Filipinas obtiene el 14% de su consumo eléctrico de los 1.870 MWe instalados, produciendo al año 9.646 GWh, siendo el complejo geotérmico de Tongonan, en la isla de Leyte, el más importante, con una capacidad instalada de 726 MWe.

2.3.1. Europa

Europa es el segundo continente, tan solo por detrás de Asia, en uso directo del calor, siendo Suecia el país que mayor uso hace de esta energía (TABLA 1).

En cuanto a generación eléctrica, Europa es el tercer continente, tanto en capacidad como en producción de energía eléctrica mediante energía geotérmica, del mundo, por detrás de América, donde el mayor productor es, como ya se ha dicho, EE.UU., y de Asia, donde destacan principalmente Filipinas e Indonesia (TABLA 2). En el continente europeo, Italia, como pionera en este tipo de tecnologías, se encuentra a la cabeza del continente, seguida por Islandia y Turquía.

Los recursos geotérmicos de alta temperatura más importantes de Italia se encuentran en la región de la Toscana. Con una capacidad total instalada de 916 MWe, la producción eléctrica alcanza los 5.660 GWh anuales. El complejo geotérmico de mayor importancia, propiedad de Enel Green Power, se sitúa en Larderello. Está formado por 34 plantas, con una capacidad total de 769 MWe, que satisfacen el 26,5% de la demanda energética de la región.

En Islandia, el 69% de la demanda de energía del país se satisface con energía geotérmica, llegando a cubrir el 90% de la demanda de calefacción y el 29% de la demanda eléctrica. Presenta una capacidad instalada de 665 MWe que generan 5.245 GWh anuales. El complejo geotérmico más grande de la isla es el de Hellisheidi, en el que además de obtenerse energía térmica para uso directo, hay instalada una capacidad eléctrica de 303 MWe.

Turquía ha conseguido un importante desarrollo geotérmico en los últimos 5 años. En los 225 yacimientos geotérmicos descubiertos en el país, se ha instalado una capacidad de 407 MWe, que generan 3.247 GWh anuales, en numerosas plantas cuya potencia oscila entre los 3 MWe y los 107 MWe.

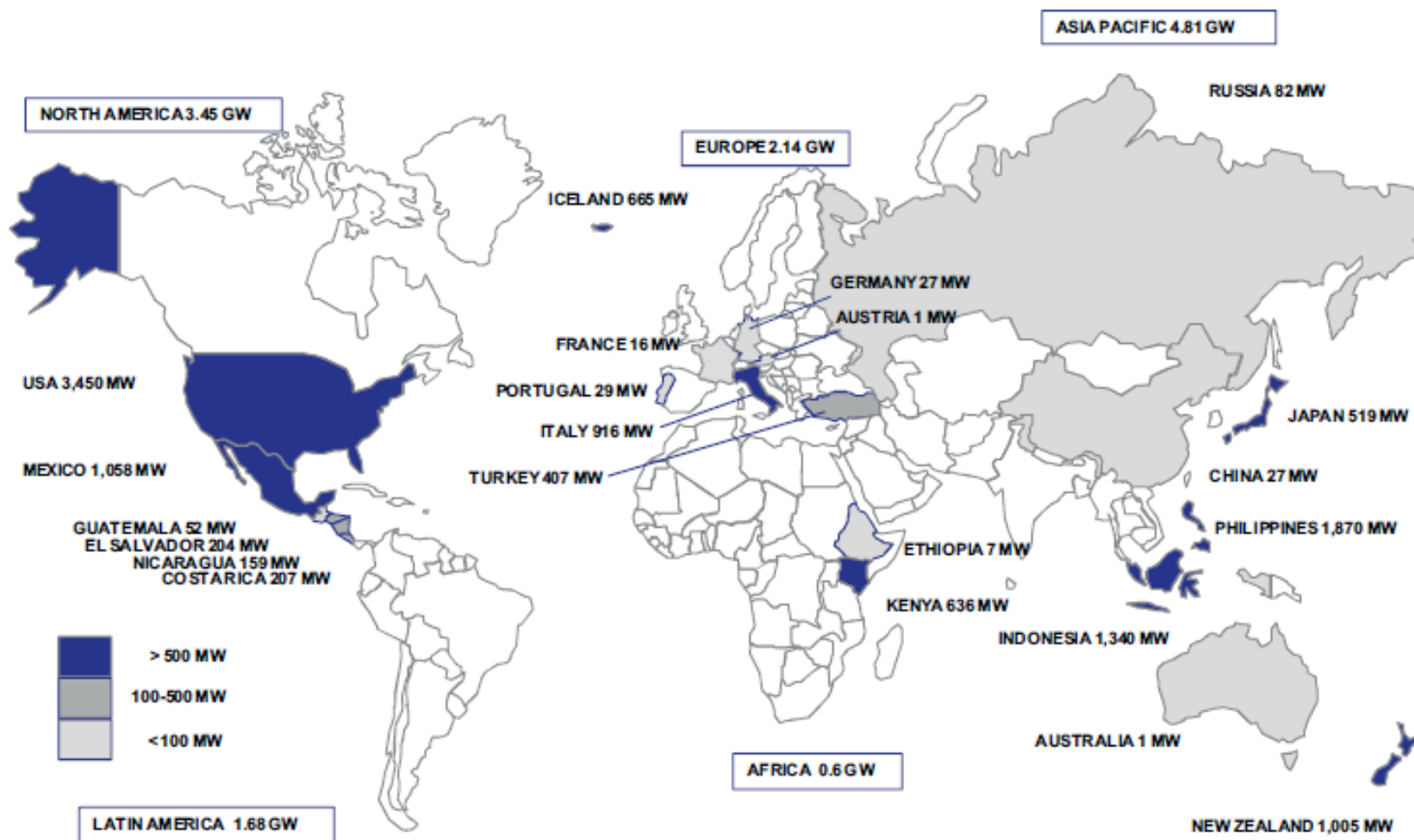


Figura 8: Distribución global de la capacidad instalada de generación eléctrica mediante energía geotérmica en 2015. [8]

Region/Continent (# countries/regions)	MWT	TJ/year	GWH/year	Capacity factor
Africa (8)	140	2,538	705	0.575
Americas (16)	19,610	99,899	27,752	0.162
Central America and Caribbean (5)	9	181	50	0.634
North America (4)	19,031	91,442	25,403	0.152
South America (7)	570	8,276	2,299	0.460
Asia (18)	25,369	260,198	72,283	0.325
Commonwealth of Independent States (5)	399	7,094	1,971	0.564
Europe (32)	24,863	214,093	59,475	0.273
Central and Eastern Europe (15)	2,819	26,220	7,284	0.295
Western and Northern Europe (17)	22,044	187,873	52,191	0.270
Oceania (3)	504	8,816	2,449	0.555
Total (82)	70,885	592,638	164,635	0.265

Tabla 1: Uso directo del calor geotérmico por continentes en 2015. [9]

Continent	Installed in 1995 (MW)	Energy in 1995 (GWh)	Installed in 2000 (MW)	Energy in 2000 (GWh)	Installed in 2005 (MW)	Energy in 2005 (GWh)	Installed in 2010 (MW)	Energy in 2010 (GWh)	Installed in 2015 (MW)	Energy in 2015 (GWh)	Forecasting for 2020 (MW)
Europe	722	3.881	1.019	5.864	1.124	7.209	1.642	11.327	2.143	14.941	3.385
Africa	45	366	52	397	136	1.088	209	1.440	643	2.878	1.601
America	3.800	21.303	3.390	23.342	3.911	25.717	4.565	26.803	5.130	26.353	8.305
Asia	1.980	10.129	3.075	17.390	3.290	18.903	3.661	23.127	3.757	22.084	6.712
Oceania	286	2.353	437	2.269	441	2.792	818	4.506	1.056	7.433	1.440
Total	6.832	38.032	7.973	49.261	8.903	55.709	10.895	67.202	12.729	73.689	21.443

Tabla 2: Distribución de la generación de energía eléctrica procedente de recursos geotérmicos en 2015. [8]

2.3.2. España

En la actualidad, el aprovechamiento de la energía geotérmica en España se limita exclusivamente al uso directo del calor de yacimientos de baja o muy baja temperatura. En el año 2010, la capacidad instalada ascendía a 141 MWt. A pesar de esta baja utilización de los recursos geotérmicos, el potencial geotérmico español es muy grande. Como se puede apreciar en la FIGURA 9 y FIGURA 10, la mayoría de los yacimientos geotérmicos que se pueden encontrar son de baja temperatura, repartidos por el noreste, centro y sur peninsular. Los yacimientos geotérmicos de media temperatura se encuentran repartidos entre Cataluña, el sureste de Andalucía, Murcia y pequeñas zonas en Galicia y Castilla-La Mancha. No se han encontrado hasta el momento yacimientos geotérmicos de alta temperatura en la península, sin embargo, si existen en el archipiélago canario, dado su origen volcánico. Además, Según estudios e investigaciones del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) el calor almacenado y explotable en el territorio nacional sería equivalente a una potencia instalada 57.563 MWt para recursos de baja temperatura, 18.695 MWe para recursos de media temperatura, 227 MWe para recursos de alta temperatura y 745 MWe para recursos de alta temperatura aprovechables mediante sistemas EGS (Sistemas Geotérmicos Estimulados), de los que se hablará más adelante.

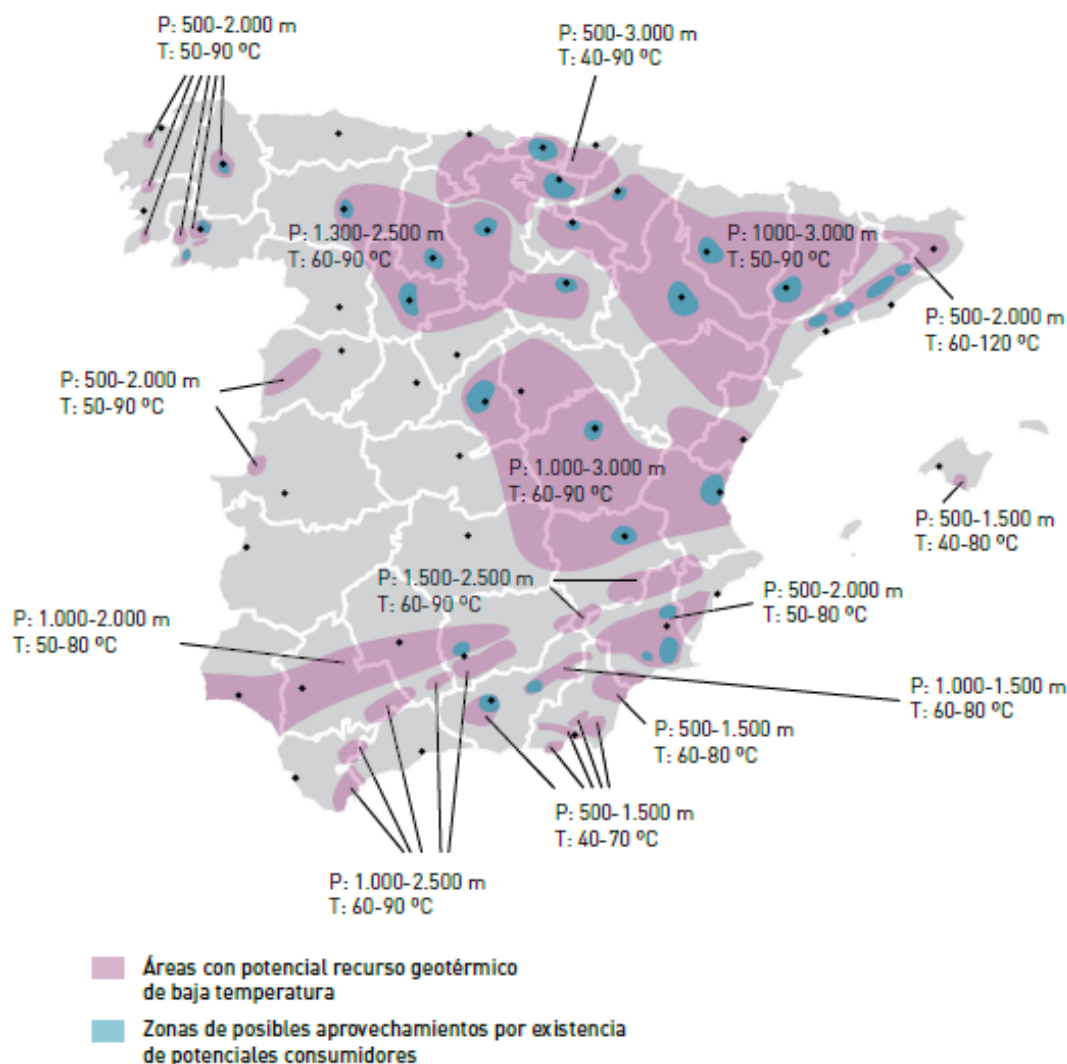


Figura 9: Mapa de recursos geotérmicos de baja temperatura y zonas de posibles aprovechamientos. [5]

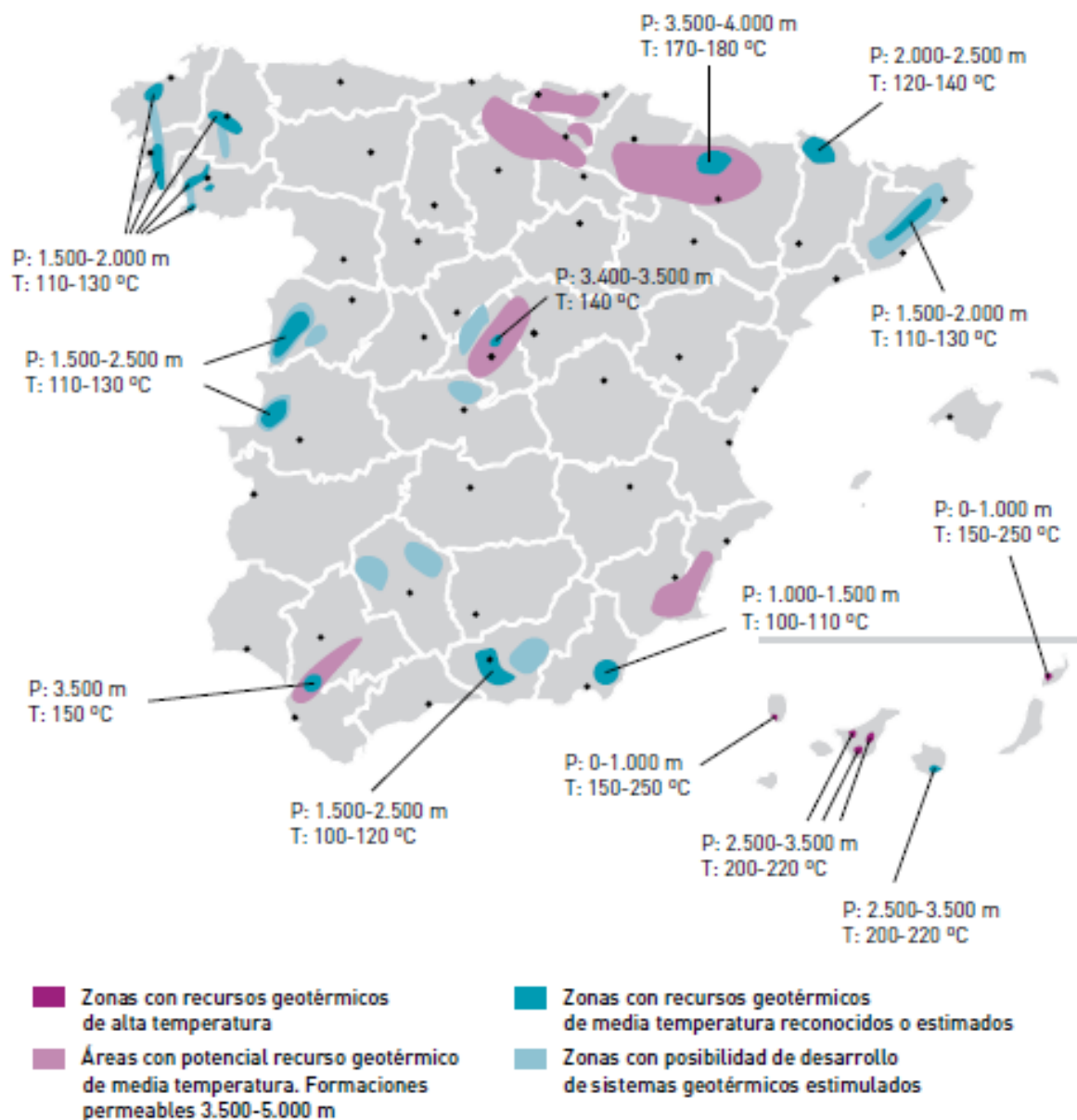


Figura 10: Mapa de recursos geotérmicos de media y alta temperatura y posibles Sistemas Geotérmicos Estimulados. [5]

3. Tecnologías de aprovechamiento de los recursos geotérmicos

El aprovechamiento de la energía geotérmica viene condicionado por el tipo de yacimiento, y por tanto de recurso geotérmico, disponible. Por ello, se pueden establecer dos grandes grupos de tecnologías de explotación de los recursos geotérmicos, que como se ha visto en el apartado anterior son: las tecnologías que aprovechan directamente el calor del yacimiento y las tecnologías que lo aprovechan para generar electricidad.

3.1. Tecnologías para usos directos del calor

Estas tecnologías aprovechan directamente el calor del subsuelo para utilizarlo en sistemas de calefacción y refrigeración, sistemas de climatización de distritos, invernaderos o piscifactorías, ACS (agua caliente sanitaria), balneoterapia, procesos industriales o cualquier otro uso que requiera agua a una temperatura por debajo de los 150°C, que se pueda obtener de recursos geotérmicos de baja o muy baja temperatura, y en algunos casos, aunque menos, de los de media temperatura.

3.1.1. Bomba de calor geotérmica

La bomba de calor geotérmica extrae el calor del subsuelo a baja temperatura, calentándolo, con el consiguiente consumo de energía, para poder usarlo posteriormente en sistemas de calefacción, y si están equipadas para ello, proporcionar agua caliente sanitaria. Además, permite invertir el proceso en verano, cediendo el calor del lugar que se quiera refrigerar a la tierra. El funcionamiento de este tipo de bombas de calor es igual al de las bombas de calor convencionales, pero consumen entre un 25% y un 50% menos de electricidad.

Las bombas de calor geotérmicas pueden conectarse con el subsuelo a través de distintos tipos de sistemas, que permiten la extracción del calor del terreno o su inyección en él. Para seleccionar el más adecuado, se deben considerar los siguientes aspectos: características geológicas e hidrogeológicas del terreno, dimensiones y uso de la superficie disponible, existencia de fuentes potenciales de calor y características de los edificios, en lo que a calefacción y refrigeración respecta. El objetivo de todo ello, es diseñar un sistema que permita obtener el mayor rendimiento con los mínimos costes posibles. Dentro de estos sistemas se pueden encontrar:

- **Sistemas abiertos:** en ellos el fluido caloportador, en este caso el agua subterránea, fluye libremente por el subsuelo, y es, tanto la fuente de calor, como el medio para el intercambio del mismo. Estos sistemas suelen requerir dos sondeos perforados, uno para el pozo de producción y otro para el de inyección, que deben realizarse a una distancia suficiente para evitar que se enfríe el agua subterránea de forma constante. El pozo de inyección puede sustituirse por un cauce de agua superficial, como puede ser un río.

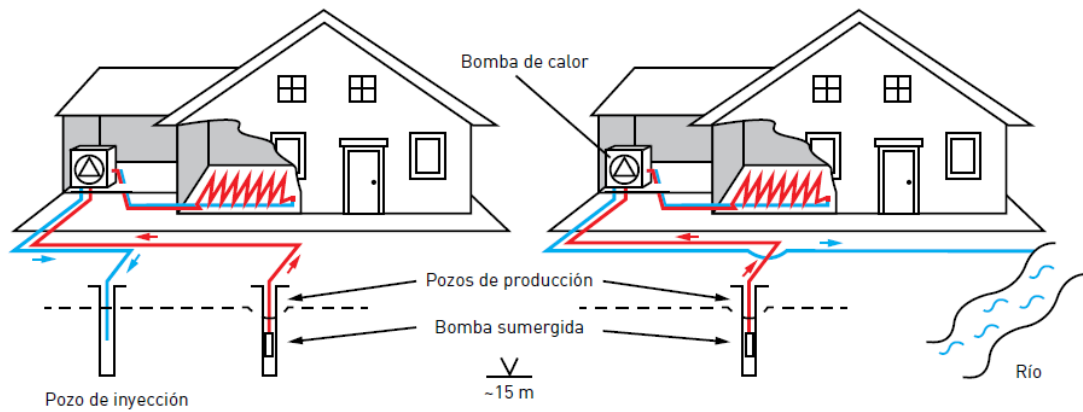


Figura 11: Bomba de calor geotérmica con sondeos de captación de agua (sistema abierto). [5]

- **Sistemas cerrados:** estos sistemas emplean intercambiadores de calor enterrados por los que circula un fluido que intercambia calor con el terreno. Se utilizan cuando las características de este último dificultan o impiden el acceso directo al yacimiento. En función de cómo se coloquen los intercambiadores en el terreno, existen dos tipos de sistemas cerrados: horizontales y verticales.

Los horizontales son más fáciles de instalar, aunque están sujetos a limitaciones de espacio, lo que llevan a un diseño más denso de la red de tuberías. Para solucionar estos problemas de espacio se ha diseñado un tipo de intercambiadores con forma de espiral, conocido como *slinky*. Una variante de estos sistemas son los denominados de expansión directa en los cuales por el intercambiador de calor enterrado circula directamente el fluido refrigerante, con lo que aumenta la eficiencia de los sistemas al eliminar uno de los procesos de intercambio de calor. La fuente de recarga térmica principal de estos sistemas, debido a la escasa profundidad, es la radiación solar, con lo que es importante no cubrir la superficie bajo la que están.

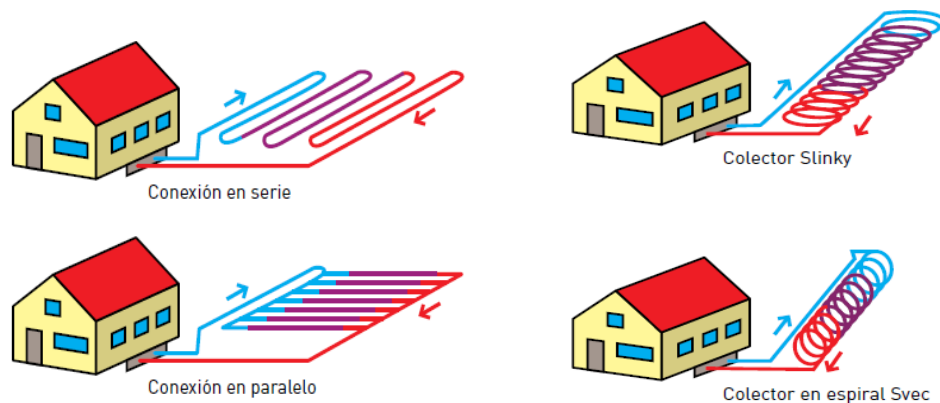


Figura 12: Sistemas cerrados con intercambiador de calor horizontal. [5]

Los verticales, también llamados sondas geotérmicas, no presentan grandes limitaciones de espacio, pero pueden requerir numerosas perforaciones en el caso de grandes instalaciones, con el coste que estas conllevan. Los tubos pueden tener forma de U, o ser coaxiales, siendo los primeros los más económicos, lo que ha hecho que se convierta en la opción de mayor implantación.

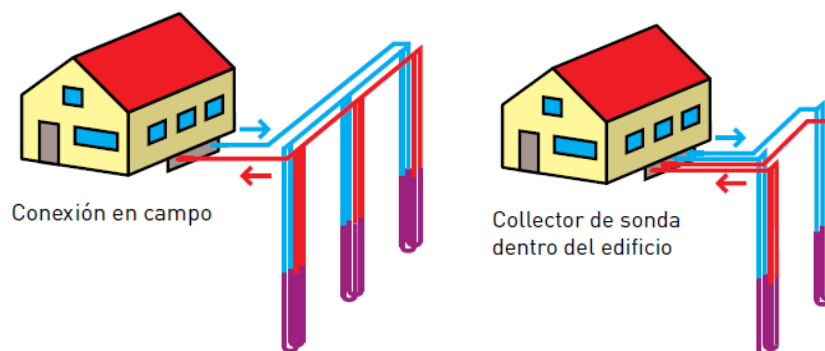


Figura 13: Sondas geotérmicas. [5]

Una variante de estos sistemas son las cimentaciones energéticas (FIGURA 14), donde las propias estructuras de cimentación de los edificios actúan como sondas geotérmicas al introducir en el interior de los pilotes de cimentación del edificio tubos en “U” que alimenten las bombas geotérmicas. En este último caso, el número de sondas geotérmicas suele sobredimensionarse, ya que en caso de que alguna sonda quede inutilizada, las bombas de calor pueden seguir funcionando sin necesidad de tener que reparar las sondas, lo cual es casi imposible una vez construido el edificio.

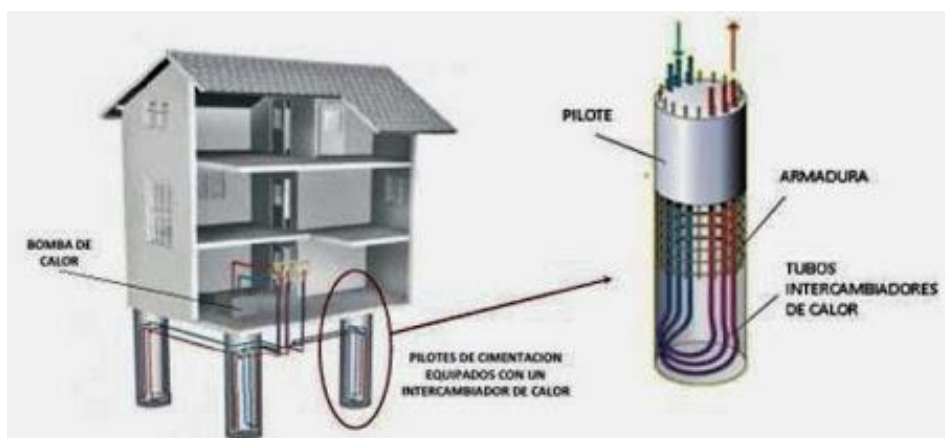


Figura 14: Sistema de cimentación energética. [10]

3.1.2. Sistemas de almacenamiento subterráneo de energía térmica (UTES)

Los sistemas de almacenamiento subterráneo de energía térmica, almacenan calor, frío, o incluso ambos bajo tierra, de forma que puedan ser aprovechados cuando las condiciones de climatización lo requieran. Para ello, se elaboran sistemas que calientan agua durante el verano, haciendo uso del calor recibido del Sol o de calor residual de plantas de cogeneración. Este calor se almacena en el terreno para poder ser aprovechado durante el invierno, enfriando de nuevo el agua, que vuelve a ser almacenada, fría, para poder repetir el proceso de manera estacional.

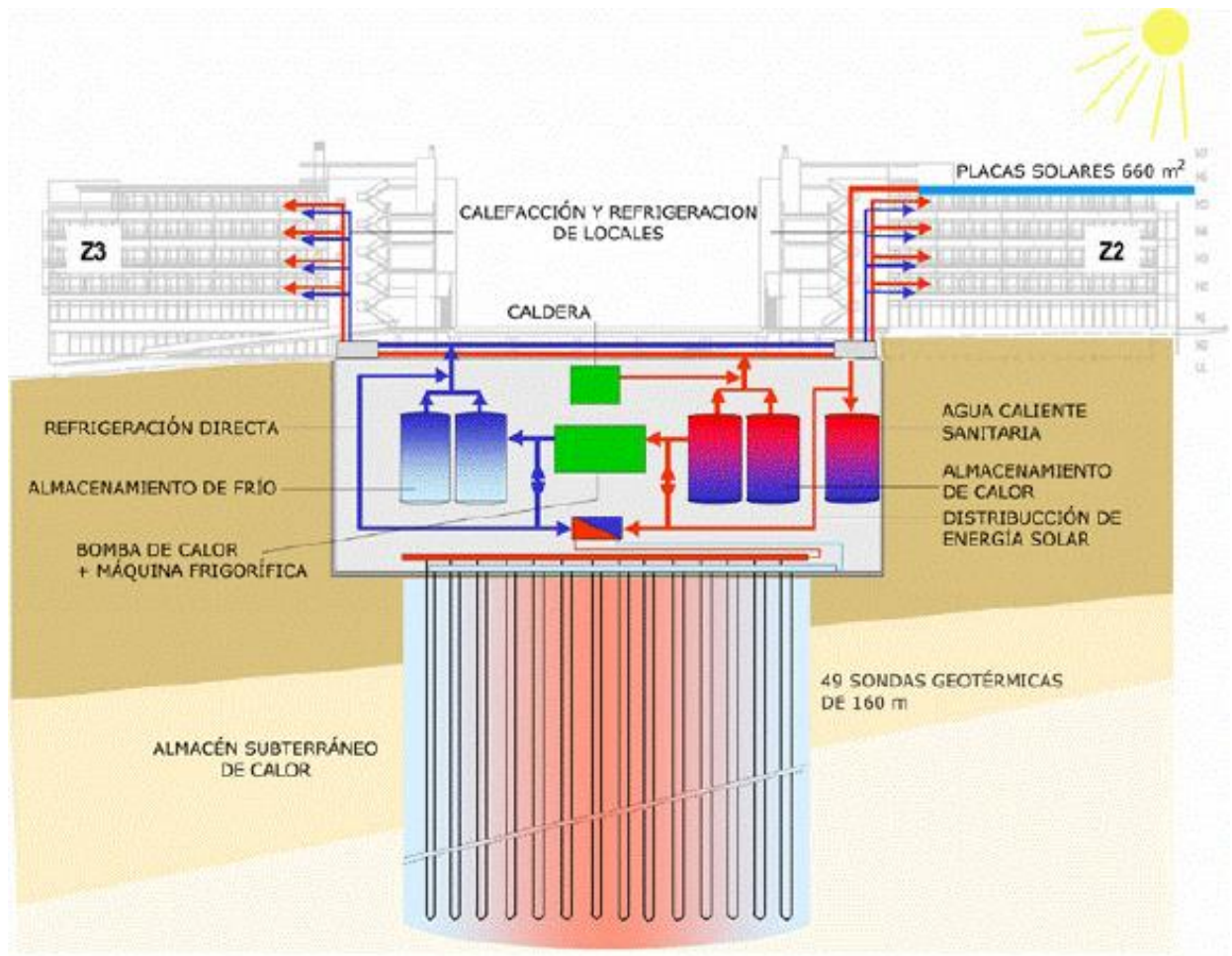


Figura 15: Esquema del “Centre D4”, el mayor centro de almacenamiento de calor subterráneo en Suiza. [7]

3.2. Tecnologías de generación de energía eléctrica

Para poder generar electricidad a partir de energía geotérmica, en general, se requieren yacimientos y recursos geotérmicos de alta temperatura. Las diferentes tecnologías de generación de electricidad a partir de recursos geotérmicos han surgido como consecuencia de las distintas características que pueden tener de dichos recursos. En función de las condiciones en las que se encuentre el fluido existen tres tipos de recurso geotérmico:

- **Recursos de vapor seco:** se trata del recurso más viable económicamente, ya que al encontrarse el fluido totalmente, o en su gran mayoría, en fase vapor, no es necesario separar este vapor del agua líquida para proceder a su uso, con lo que se aprovecha el calor contenido de forma mucho más eficiente. Sin embargo, es el tipo de recurso menos frecuente al requerir condiciones de presión y temperatura muy elevadas para mantener el agua en estado de vapor sobrecalentado.

- **Recursos de vapor húmedo:** corresponden a fluidos contenidos casi en su totalidad en estado líquido, pero que, durante su ascenso por los pozos de producción, debido a su alta temperatura y la disminución de la presión, se vaporizan (parcialmente), con lo que puede emplearse el vapor de agua para generar electricidad.
- **Recursos de moderada temperatura:** en este caso el fluido, en fase líquida, no se halla a temperatura suficiente como para producir vapor a una presión suficiente como para mover una turbina de vapor. No obstante, puede emplearse la energía almacenada en dicho fluido para evaporar otro (fluido secundario), de menor temperatura de vaporización, en un intercambiador, para que sea este el encargado de mover la turbina.

Según el recurso geotérmico que utilizan, existen tres tipos de plantas de generación eléctrica: plantas de vapor seco, plantas flash y plantas de ciclo binario. Deben considerarse también las plantas de ciclo combinado, que combinan las tecnologías flash y binaria, y otras tecnologías que podrían catalogarse como “no convencionales”, que serían los Sistemas Geotérmicos Híbridos y los Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS).

3.2.1. Plantas de vapor seco

Las plantas de vapor seco utilizan vapor en estado de saturación o ligeramente sobrecalentado para producir electricidad. Este vapor, después de atravesar distintos filtros encargados de retener los sólidos en suspensión en dicho vapor, puede ser enviado a la turbina, como ocurre en la mayor parte de este tipo de centrales, o en el caso de que presente un gran carácter corrosivo, se puede conducir dicho vapor por un intercambiador de calor, condensándolo, de forma que ceda su energía para vaporizar un agua más limpia, y que sea el nuevo vapor el que mueva la turbina. Este último sistema no se emplea actualmente, ya que usar un intercambiador de calor solo consigue reducir la eficiencia de la planta, y los nuevos materiales con que están fabricadas las turbinas son capaces de resistir la presencia de sustancias corrosivas en el vapor. El fluido saliente de la turbina, generalmente, es llevado a un condensador, y de él, es devuelto al subsuelo a través del pozo de inyección. Sin embargo, hay centrales que liberan directamente el vapor procedente de la turbina a la atmósfera. Estas últimas, aunque presentan costes de instalación mucho más bajos, consumen aproximadamente el doble de vapor por kilovatio producido, con lo que solo se emplean para plantas piloto, en pozos de producción aislados o para centrales de punta. Además, deben usarse obligatoriamente cuando el contenido en gases no condensables sea superior al 50% o cuando el contenido total de gases sea superior al 10%, debido al elevado coste de separación de estos en los condensadores.

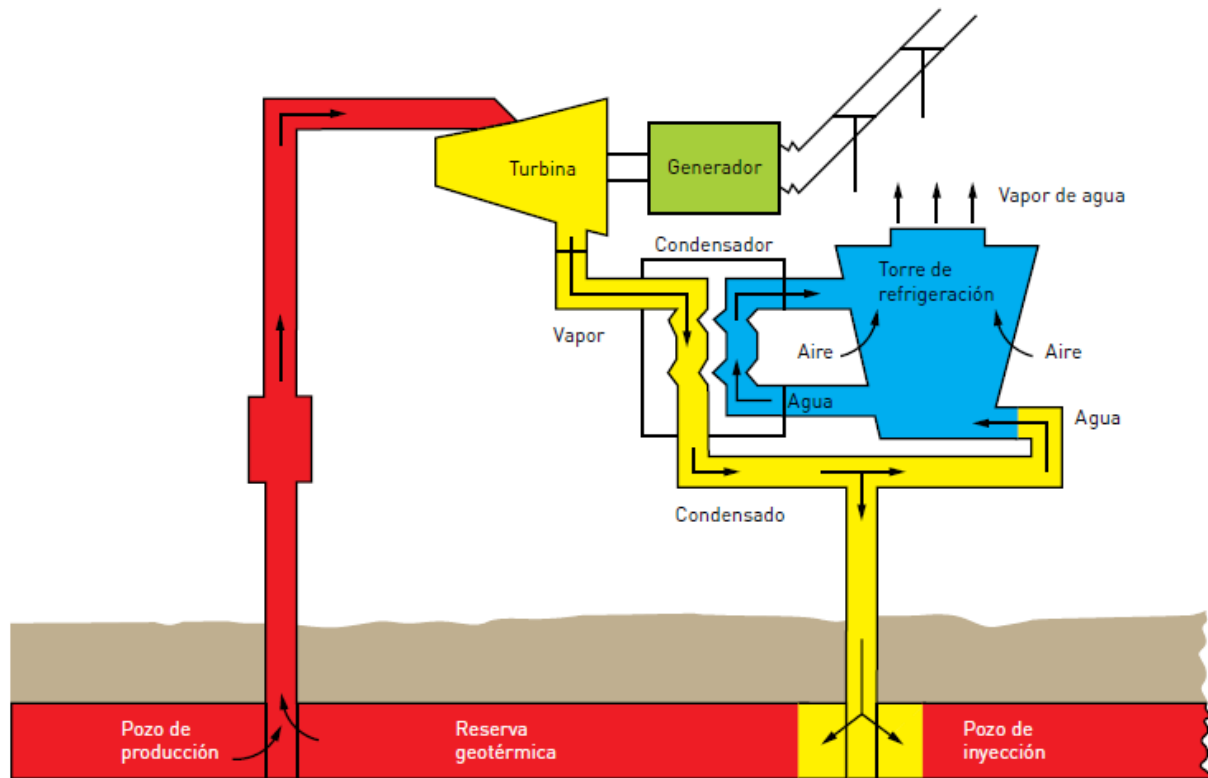


Figura 16: Esquema de funcionamiento de una planta de vapor seco. [5]

3.2.2. Plantas flash

Las plantas flash utilizan recursos geotérmicos de alta temperatura de entre 180°C y 250°C, donde el fluido obtenido de los pozos de producción es una mezcla de vapor y líquido. Por ello, se utilizan separadores para separar ambas fases del fluido. El vapor es enviado directamente a una turbina, mientras que el agua líquida pasa por una o varias etapas de separación, en función de su temperatura, cada una de ellas en un separador líquido-vapor cada vez a menos presión. El vapor obtenido en cada uno de estos separadores es llevado a una turbina de baja presión para generar electricidad. Por último, el vapor procedente de las turbinas se lleva al condensador, y de este, junto con el agua residual que no ha podido vaporizarse en los separadores, se reinyecta al yacimiento. Todo este fluido, aún caliente puede, antes de reinyectarse en el terreno, ser utilizado en cualquiera de los sistemas de uso directo del calor vistos en el APARTADO 3.1.

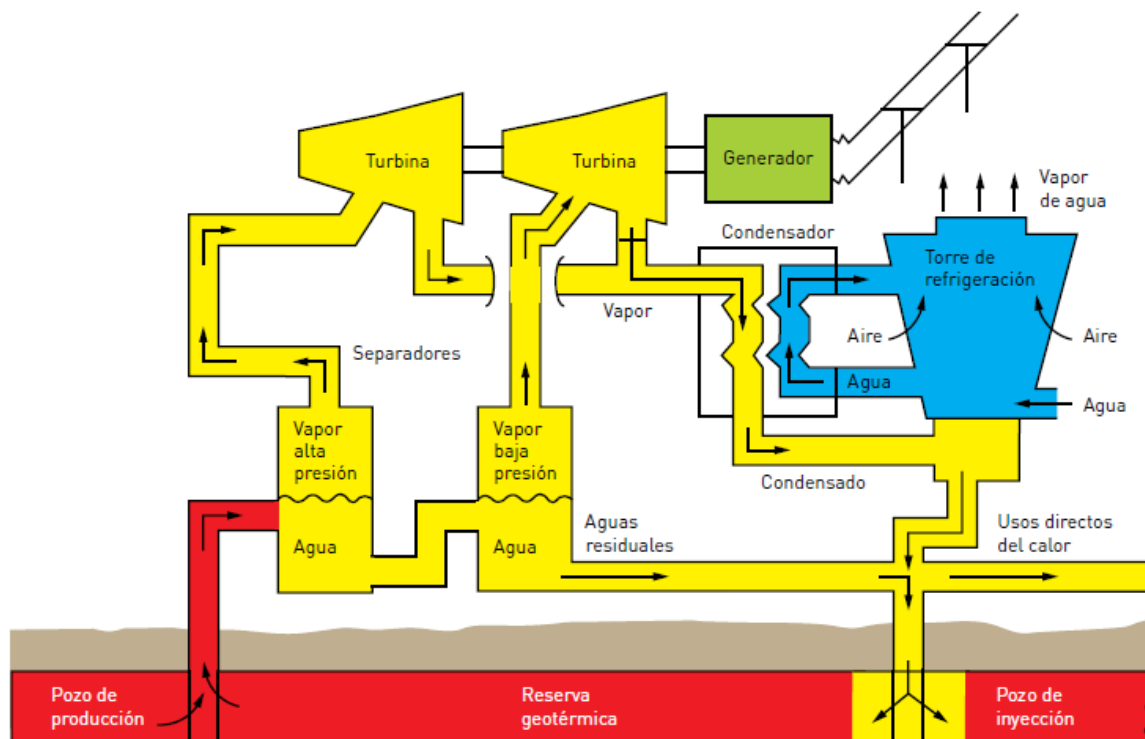
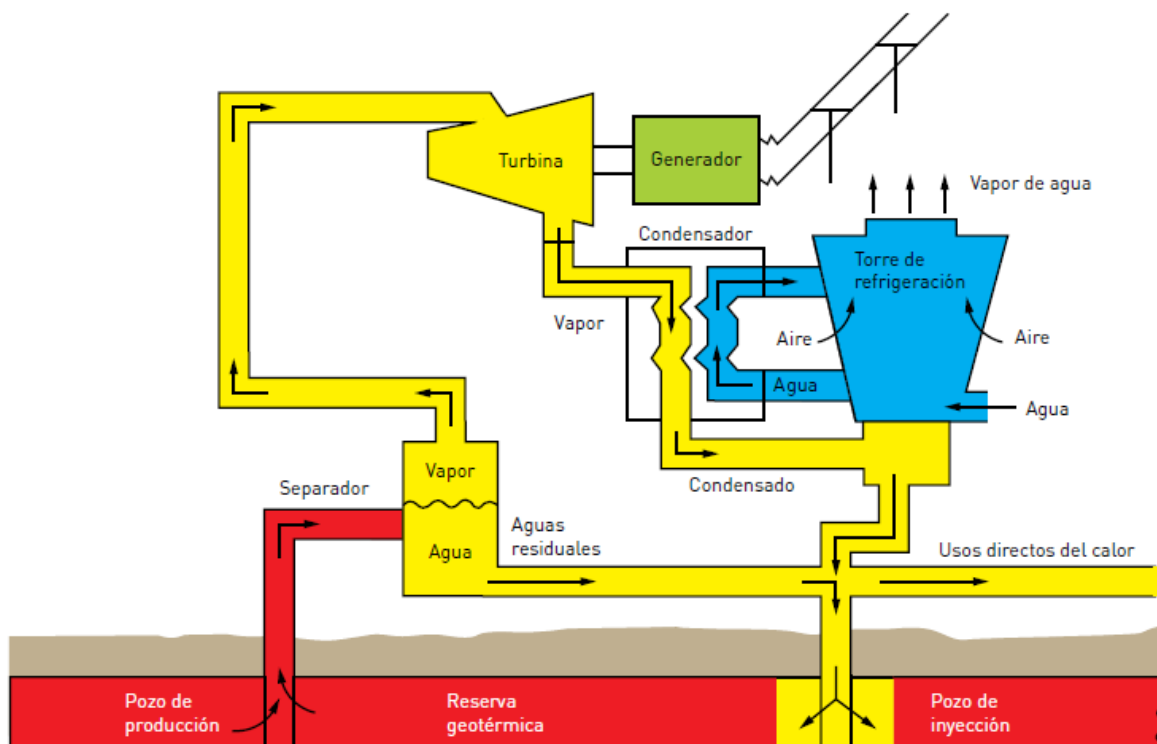


Figura 17: Esquemas de funcionamiento de plantas flash (arriba) y doble-flash (abajo).
[5]

3.2.3. Plantas de ciclo binario

Este tipo de centrales están constituidas por dos circuitos, uno de ellos por el que circula el agua subterránea, y otro por el que circula el fluido de trabajo en un circuito cerrado. Ambos fluidos intercambian calor en un intercambiador, de forma que es el fluido de trabajo, tras evaporarse, el que mueve la turbina. Este fluido puede ser agua, si la temperatura del recurso geotérmico es lo suficientemente alta, u otro fluido con bajo punto de ebullición y alta presión de vapor a esa temperatura. El fluido varía en función de la tecnología empleada en la planta. Estas plantas utilizan recursos con un rango de temperaturas que oscila entre 100°C y 150°C (75°C y 180°C para las más modernas). Los ciclos binarios pueden dividirse en: Ciclos Orgánicos Rankine y Ciclos Kalina.

Los Ciclos Orgánicos Rankine (ORC) utilizan como fluido de trabajo hidrocarburos volátiles, como propano, n-butano, isobutano o isopentano. Su principal inconveniente es su baja eficiencia cuando el fluido tiene que trabajar fuera de las condiciones del ciclo para el que fue diseñado. Pese a ello, se trata de una tecnología muy fiable.

Por otro lado, los Ciclos Kalina emplean amoníaco (NH₃) disuelto en agua, donde solo el amoníaco es vaporizado en el intercambiador de calor. Esta tecnología, más reciente, consigue rendimientos entorno a un 2,5% más altos que los ciclos ORC, y, además, el ciclo se adapta mejor a cambios en las condiciones de trabajo, con lo que a priori resulta ventajosa.

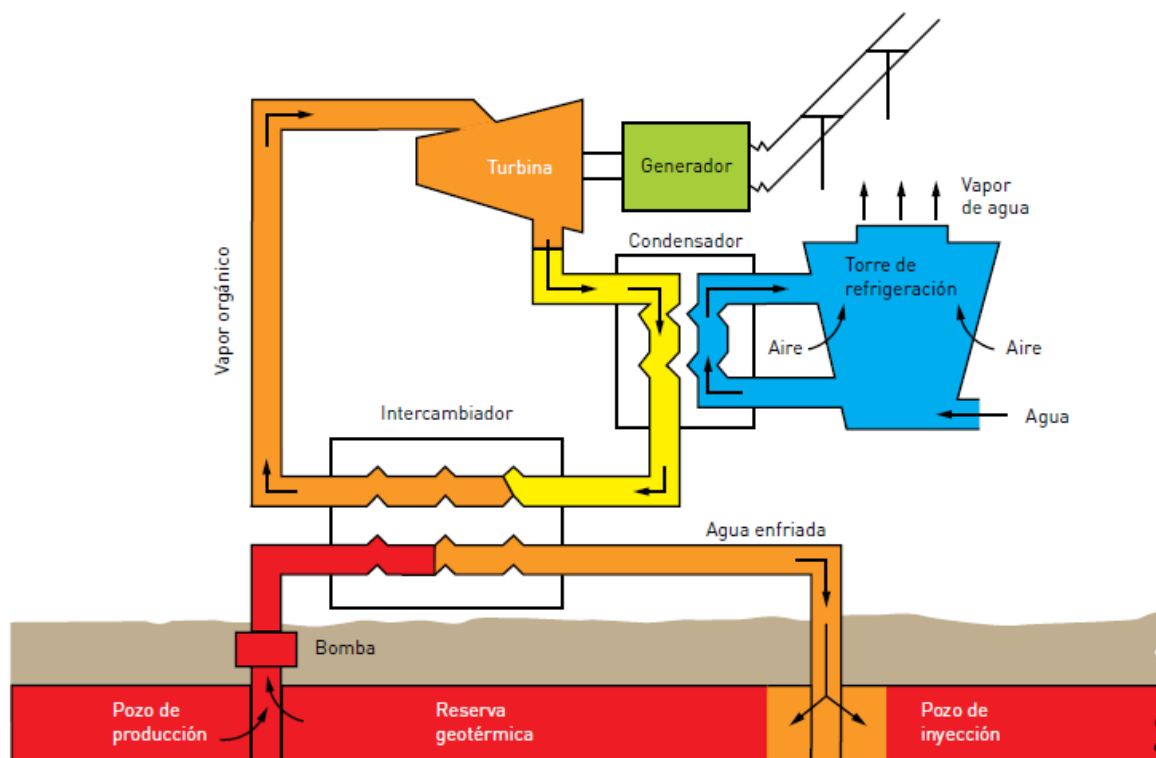


Figura 18: Esquema de funcionamiento de una planta de ciclo binario. [5]

3.2.4. Plantas de ciclo combinado (flash-binario)

En las plantas de ciclo combinado se implementan conjuntamente las tecnologías flash y binaria para generar electricidad, alcanzando valores de eficiencia máxima en yacimientos de alta temperatura. En estas plantas, el vapor almacenado en el yacimiento

se separa del líquido para ser aprovechado en un proceso flash. Una vez condensado, en vez de reinyectarlo al terreno, se envía a un ciclo binario para que el calor remanente en el fluido sea aprovechado a través de un fluido secundario. En estas centrales, es necesario controlar la temperatura del agua de reinyección, ya que, de ser extremadamente baja, podría agotar el recurso geotérmico en un corto periodo de tiempo.

3.2.5. Plantas geotérmicas híbridas

Las plantas geotérmicas híbridas combinan las fuentes de energía geotérmicas con cualquier otra fuente de energía, con lo que consiguen que el fluido de trabajo alcance temperaturas superiores y se pueda obtener el óptimo económico del ciclo termodinámico correspondiente, que de otra forma siempre viene limitado por la temperatura del recurso geotérmico.

Se incluyen también en este grupo los sistemas de uso combinado de calor y electricidad (utilización en cascada), que aprovechan el calor residual del fluido geotérmico de las plantas de generación eléctrica en proyectos de uso directo del calor, de forma que aumenta la eficiencia del sistema completo.

3.2.6. Coproducción con petróleo y gas

La presencia de agua caliente en los pozos de petróleo y gas natural, aunque no siempre se produce, alcanza a veces el 95% de la producción del pozo lo cual solo genera costes, ya que hay que bombearla, separarla de los hidrocarburos y reinyectarla al terreno. Si en lugar de reinyectarla se envía esta agua a una central de ciclo binario, en lugar de un problema para la industria petrolera, se convertiría en una fuente adicional de ingresos. Por otro lado, también beneficiaría a la central de producción eléctrica, ya que, al usar pozos existentes, se eliminan los costes derivados de dicha perforación que son los que constituyen el mayor porcentaje de la inversión de este tipo de centrales.

3.2.7. Sistemas geotérmicos estimulados (EGS)

Estos sistemas pretender aprovechar los yacimientos geotérmicos de alta temperatura de los que no hacen uso las tecnologías tratadas en los apartados anteriores, es decir, los yacimientos de roca caliente seca y los yacimientos supercríticos.

Por un lado, los yacimientos HDR, como ya se había avanzado en el APARTADO 2.2., al tratarse de yacimientos de rocas densas, de escasa o nula permeabilidad, y con ausencia de fluido geotérmico, es necesario emplear métodos como la fracturación hidráulica para generar la permeabilidad suficiente como para hacer circular por el yacimiento el fluido de trabajo. En cuanto a los métodos de generación eléctrica, podrían emplearse los sistemas ya existentes (ciclos flash, ciclos binarios y ciclos combinados) realizando pequeños cambios en sus componentes.

Por otro lado, los yacimientos supercríticos necesitan hacer uso de los llamados sistemas de triple expansión, una variación de los sistemas doble-flash, con una turbina capaz de soportar las condiciones de presión del recurso geotérmico. Puesto que estos yacimientos se hallan a profundidades de más de 7,5 km, actualmente resultan económicamente inviables, con lo que los avances en investigaciones de este tipo de sistemas son limitados por el momento, centrándose más en los sistemas HDR.

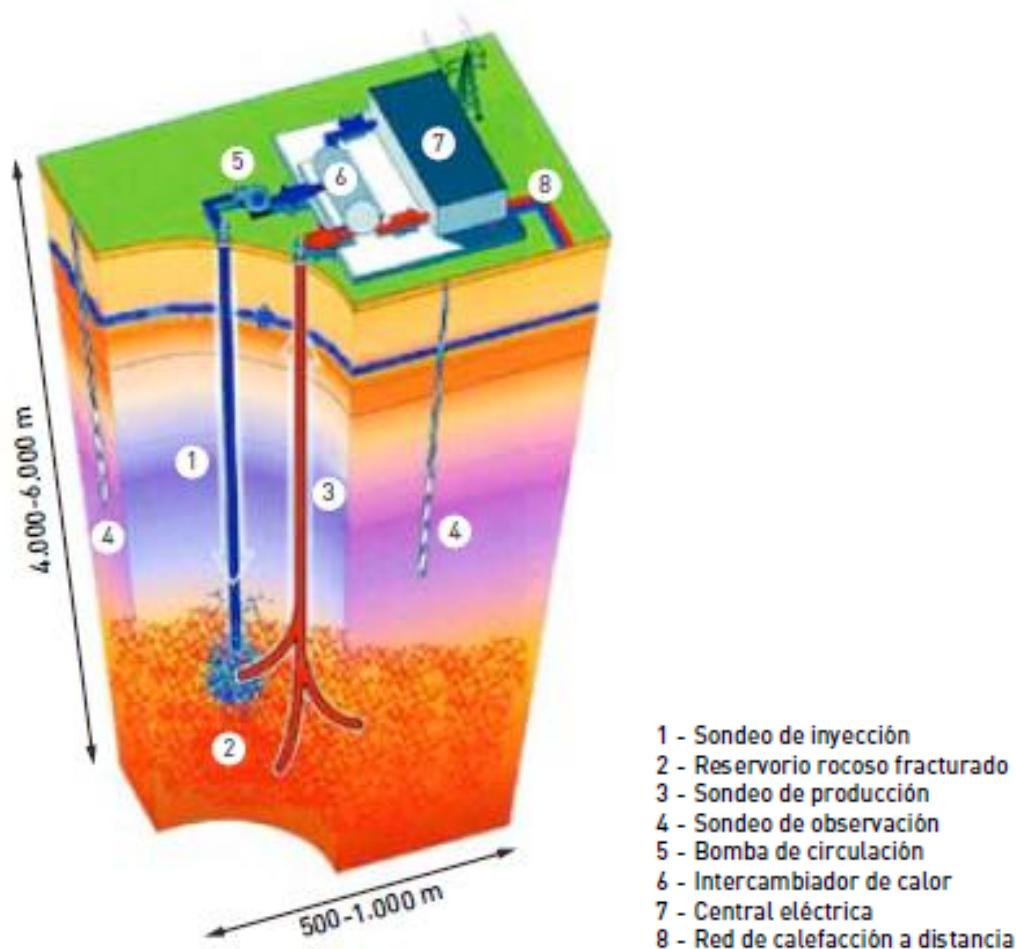


Figura 19: Esquema de un sistema geotérmico estimulado. [5]

Los proyectos de investigación realizados hasta la fecha, han demostrado que la tecnología EGS puede utilizarse, no solo para crear nuevos yacimientos de explotación, sino también en los yacimientos convencionales para ampliar su productividad, periodo de explotación, dimensiones o hacer uso de aquellos cuya explotación era inviable hasta ahora.

3.2.7.1. CO₂ supercrítico como fluido de trabajo

Un fluido, se dice que está en estado supercrítico, cuando se encuentra en condiciones de presión y temperatura por encima de sus valores de presión y temperatura críticas. En condiciones supercríticas, el fluido se comporta como un híbrido entre un líquido y un gas.

En un diagrama de fases, estas se encuentran separadas por las curvas de fusión/solidificación, sublimación y vaporización/condensación, donde conviven dos fases, y existe un único punto, el denominado como punto triple, donde coexisten las tres fases. Existe además un punto, denominado punto crítico, que coincide con el final de la curva de vaporización/condensación, donde el valor de presión y temperatura son los definidos como críticos. Cualquier fluido, en condiciones de presión y temperatura por encima de dichos valores, no experimenta licuefacción al presurizarse, ni vaporización al calentarse. En la FIGURA 20 y en la FIGURA 21 se muestran los diagramas de fase del agua y del CO₂.

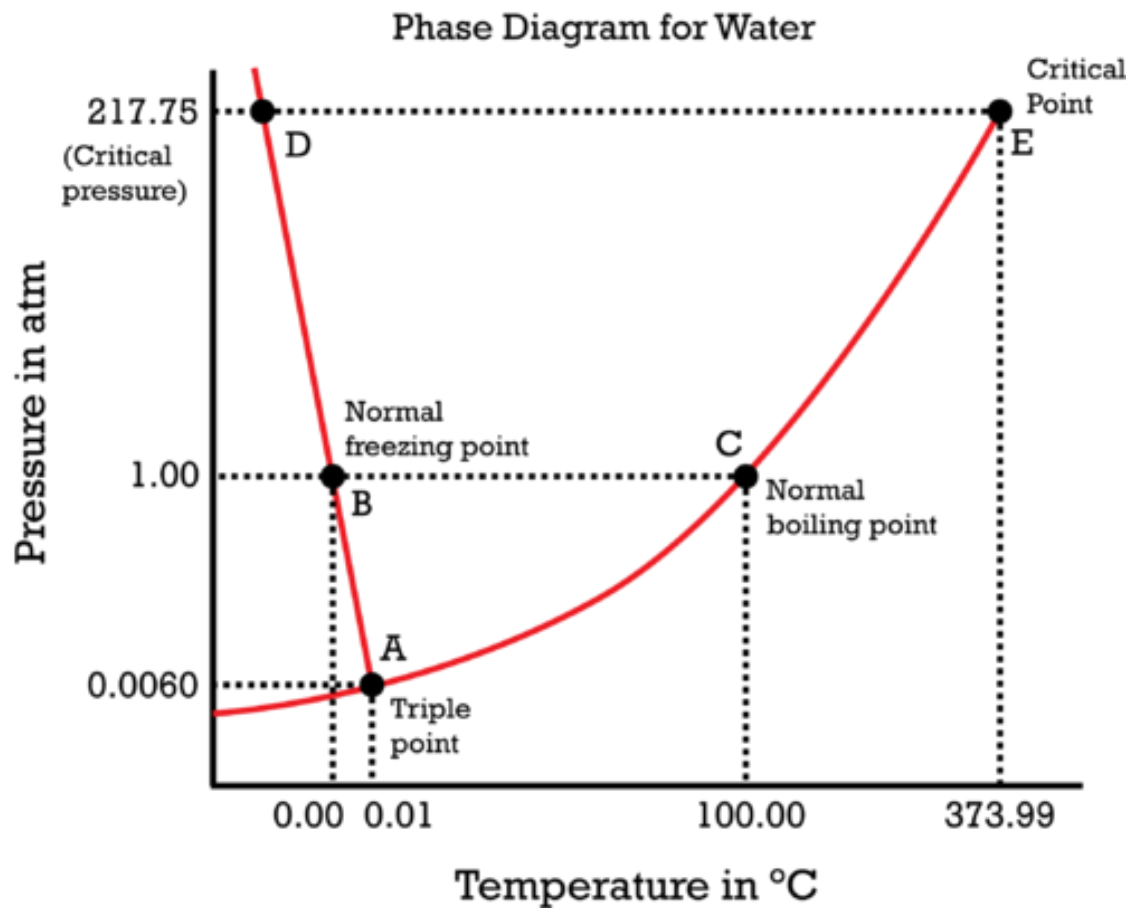


Figura 20: Diagrama de fases del agua. [11]

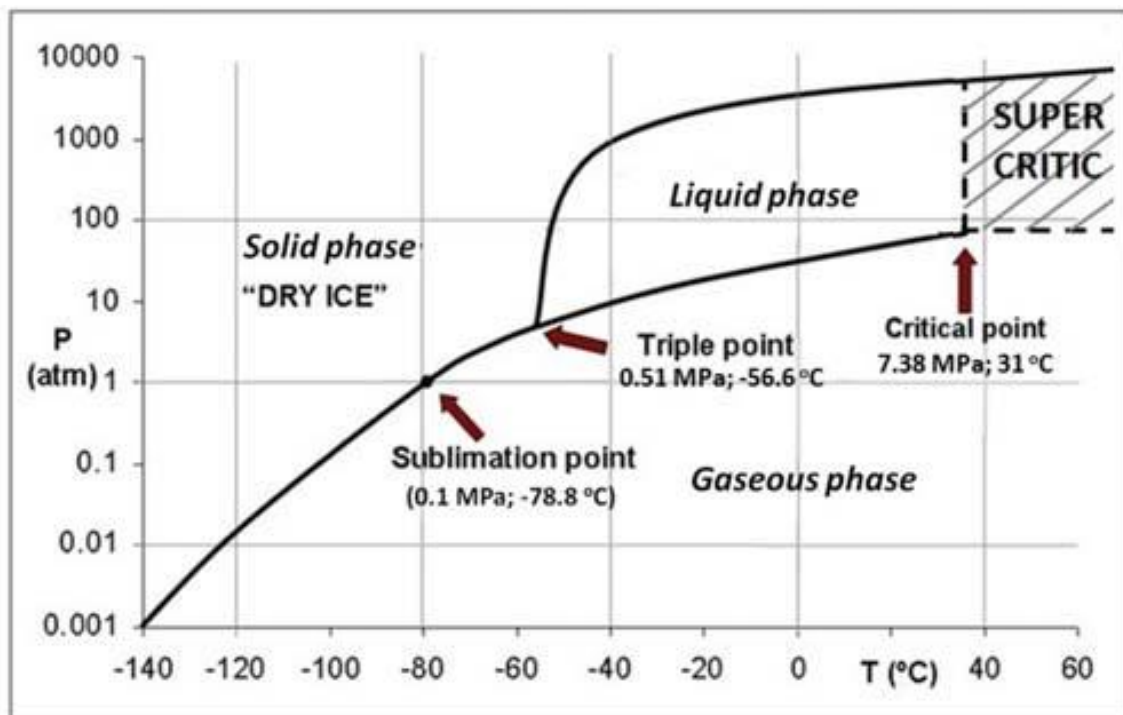


Figura 21: Diagrama de fases del CO₂. [12]

Actualmente, las tecnologías de aprovechamiento de energía geotérmica usan, casi en su totalidad, agua como fluido para extraer el calor de los yacimientos geotérmicos. En el caso de los yacimientos convencionales es lo normal, ya que la extracción por completo del agua contenida en estos, además de ser costosa, podría agotar la energía del yacimiento. Sin embargo, en los yacimientos HDR, se ha sugerido que el uso de CO₂ supercrítico como fluido de trabajo aumentaría la extracción de calor en torno a un 50% con respecto al uso de agua [13].

El uso de CO₂ generaría, además, las siguientes ventajas:

1. Elevada expansividad, lo que proporciona grandes diferencias de densidades entre el CO₂ en el pozo de inyección y en el pozo de producción, lo que genera fuerzas de flotación que reducen el consumo de los sistemas de impulsión del fluido.
2. La viscosidad del CO₂ es menor que la del agua, con lo que se alcanza mayores velocidades de flujo para un mismo gradiente de presiones.
3. Baja solubilidad de sales, lo cual reduce los problemas derivados de la precipitación de estas en los sistemas de la instalación.
4. Captura y almacenamiento de parte del CO₂ inyectado en el yacimiento. En el caso de las plantas que trabajan con agua esto supone un inconveniente que aumenta los costes de producción. Sin embargo, la captura de CO₂ bajo tierra supone la posibilidad de retirar grandes cantidades de un gas contaminante de la atmósfera.

4. Diseño termodinámico de la planta

Una vez descritas las características de los recursos geotérmicos y tras haber analizado el estado del arte de las distintas tecnologías de aprovechamiento de los mismos se va a proceder al diseño termodinámico de la planta de potencia. Para ello, es necesario definir la tecnología a emplear y las características del yacimiento objetivo, así como también el tipo de ciclo y de fluido de trabajo.

4.1. Selección de la tecnología y la localización

Para poder proceder al diseño del ciclo termodinámico de una planta de producción de potencia se debe definir en primer lugar el tipo de tecnología que se desea emplear y el lugar geográfico donde se va a situar dicha planta. En el caso de las plantas de generación eléctrica convencionales, el uso de fuentes de energía que pueden ser transportadas a cualquier lugar, como son los combustibles fósiles, hace que la selección de la tecnología de generación no tenga que depender necesariamente de la localización de la planta. Sin embargo, para la mayoría de las centrales cuya fuente de energía es renovable, al no ser esta fuente transportable, la tecnología de producción de electricidad y la localización de la central están fuertemente relacionadas, con lo que no se pueden elegir por separado.

En el caso de una central geotérmica, la tecnología viene condicionada por el recurso geotérmico del que se disponga, que se haya en un yacimiento determinado. La central debe situarse, por tanto, sobre la superficie del yacimiento que se pretende aprovechar. Para conseguir generar altas potencias, existen dos opciones, o se utilizan recursos de yacimientos de temperaturas muy altas, o bien hay que desarrollar una planta híbrida que permita elevar la temperatura de recursos geotérmicos de temperaturas más bajas, con lo que la tecnología geotérmica tendría una función meramente precalentadora del fluido.

En cuanto a la localización, en este caso, se desea situar la central en España, por lo que las opciones tecnológicas están mucho más acotadas. Como se ha podido observar en las FIGURA 9 y FIGURA 10 del APARTADO 2.3.2, los yacimientos geotérmicos de alta temperatura, con presencia de fluido en su interior, de España se hallan exclusivamente en el archipiélago canario, y se trata de yacimientos de pequeño tamaño con apenas unas pocas decenas de kilómetros cuadrados de superficie en el mejor de los casos (TABLA 3). De esta forma, la única opción posible, sin recurrir a la hibridación de tecnologías, es el aprovechamiento de yacimientos HDR mediante sistemas geotérmicos estimulados. La localización apropiada de un EGS viene condicionada por numerosos factores como son: el gradiente geotérmico, la temperatura, la profundidad, el volumen y la permeabilidad del yacimiento, entre otros.

4.1.1. Gradiente geotérmico y temperatura del yacimiento

Los yacimientos de mayor temperatura se hallan a menor profundidad en las zonas donde el gradiente geotérmico es más alto. Este gradiente de temperaturas viene dado por el flujo de calor de dicha zona. Como puede verse en la FIGURA 22, el flujo de calor en el territorio peninsular varía mucho a lo largo del mismo. En la TABLA 4 se muestra el flujo de calor medio en las distintas regiones de la Península Ibérica. Galicia, es la comunidad autónoma con el flujo de calor medio más alto (108,2 mW/m²), muy por encima de la media de toda la península (73,3 mW/m²).

En cuanto a las temperaturas del subsuelo, no se tienen datos reales de temperaturas por debajo de los 2 km de profundidad, por lo que se basará este estudio en estimaciones realizadas mediante modelos matemáticos. Para poder estimar el perfil de temperaturas en función de la profundidad se van a asumir las siguientes hipótesis:

- La litosfera continental se encuentra en equilibrio térmico.
- El flujo de calor está en estado estacionario.
- La temperatura y el flujo de calor en la superficie es conocido.

Estas hipótesis permiten resolver la ecuación de Poisson unidimensional para la temperatura, que proporciona la dependencia funcional de esta con la profundidad:

$$T = T_0 + \frac{q_0}{k}r - \frac{\dot{q}}{2k}r^2 \quad (1)$$

Siendo:

T : Temperatura a una profundidad “ r ” [K]

T_0 : Temperatura en la superficie [K]

r : Coordenada radial (Profundidad) [m]

\dot{q} : Flujo de calor radiogénico por unidad de volumen $\left[\frac{W}{m^3}\right]$

q_0 : Flujo de calor por unidad de superficie en el exterior $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

k : Conductividad térmica del terreno $\left[\frac{W}{mK}\right]$

Area	Zone	Surface (km ²)	T_{3km} (°C)	ρ_i (kg/ m ³)	C_i (J/ kg °C)	T_0 (°C)	T_T (°C)	THK (m)	T_i (°C)	ϕ	R (%)	ARB_d (10 ¹⁸ J)	H_0 (10 ¹⁸ J)	H_R (10 ¹⁸ J)	H_R (10 ¹⁸ J)	W_i (MW)
Tenerife	Dorsal	30	200	2700	900	20	200	100	60	0.05	0.3	19.70	1.06	0.32	0.88	110
	Oeste	16	180	2700	900	20	180	100	60	0.05	0.3	8.40	0.48	0.15	0.41	51
	Sur	20	180	2700	900	20	180	100	60	0.05	0.3	10.50	0.60	0.2	0.52	65
Lanzarote	Hilario y Camellos	0.005	600 (1 km)	2700	900	20	300	500	60	0.05	0.3	0.003	0.0015	0.0005	0.0014	0.17
La Palma	Teneguía	0.055	300 (1 km)	2700	900	20	200	500	60	0.05	0.3	0.019	0.01	0.003	0.008	1.01
												38 622	2.15	0.670	1.820	227.18

Tabla 3: Yacimientos geotérmicos de alta temperatura con presencia de agua en España. [14]

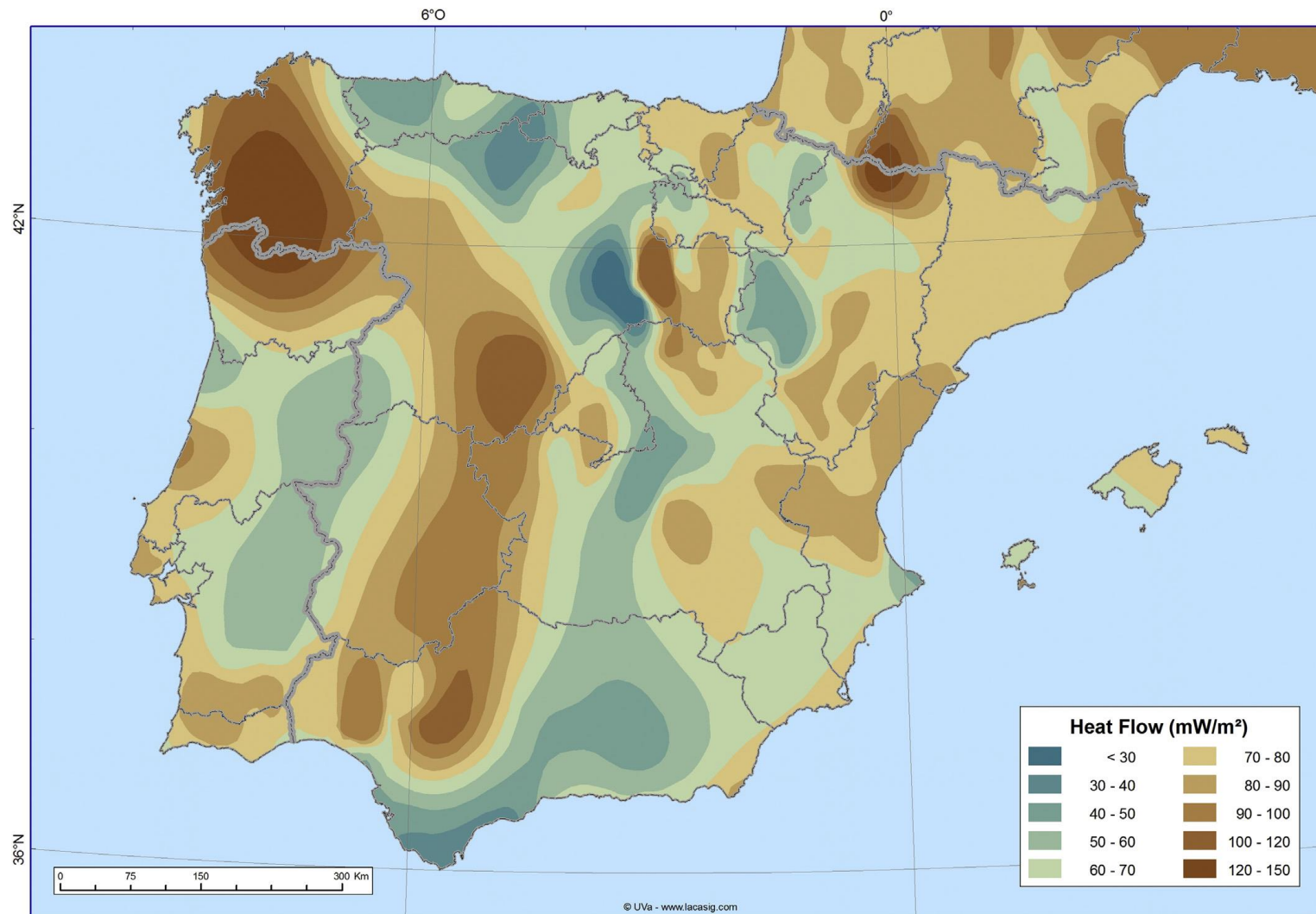


Figura 22: Mapa de la distribución de flujo de calor por unidad de superficie en el exterior. [15]

Region	Region NUTS code	Surface	Surface	Mean surface heat flow	Surface with T_{2000} data	F_{NPA}
		km ²	%	mW m ⁻²	%	
Iberian Peninsula	IP	587,857	100.0	73.3	47.3	0.260
Spain (continental + ES53)	ES	498,598	84.8	73.3	49.0	0.269
Portugal (continental)	PT	89,259	15.2	72.9	38.0	0.210
Galicia	ES11	29,644	5.0	108.2	0.0	
Principado de Asturias	ES12	10,610	1.8	51.8	19.2	
Cantabria	ES13	5317	0.9	58.6	100.0	
País Vasco	ES21	7229	1.2	74.4	100.0	
Comunidad Foral de Navarra	ES22	10,385	1.8	71.4	100.0	
La Rioja	ES23	5042	0.9	68.4	100.0	
Aragón	ES24	47,730	8.1	72.4	100.0	
Comunidad de Madrid	ES30	8023	1.4	68.5	46.3	
Castilla y León	ES41	94,225	16.0	72.5	36.2	
Castilla-La Mancha	ES42	79,414	13.5	69.7	55.7	
Extremadura	ES43	41,679	7.1	80.5	0.0	
Cataluña	ES51	32,203	5.5	77.0	100.0	
Comunidad Valenciana	ES52	23,264	4.0	76.6	100.0	
Islas Baleares	ES53	4917	0.8	71.5	0.0	
Andalucía	ES61	87,608	14.9	66.0	20.5	
Región de Murcia	ES62	11,309	1.9	66.5	99.7	
Norte	PT11	21,350	3.6	91.9	0.6	
Algarve	PT15	5016	0.9	78.1	97.6	
Centro	PT16	28,299	4.8	65.9	29.9	
Lisboa	PT17	2918	0.5	75.4	95.0	
Alentejo	PT18	31,677	5.4	65.2	55.6	

Tabla 4: Superficie, superficie relativa, flujo de calor por unidad de superficie, porcentaje de la superficie con datos de temperaturas a 2 km de profundidad y factor de zonas naturales protegidas por regiones de la Península Ibérica. [15]

En las zonas para las cuales se dispone de datos reales de temperaturas a 2 km de profundidad, se puede hacer uso de estos datos para que la estimación de temperaturas a profundidades mayores se aproxime más a la realidad. Para ello, hay que realizar los siguientes cambios en la ecuación anterior:

$$T = T_{2km} + \frac{q_{2km}}{k}(r - 2000 \text{ m}) - \frac{\dot{q}}{2k}(r - 2000 \text{ m})^2 \quad (2)$$

$$q_{2km} = q_0 - 2000 \text{ m} \cdot \dot{q} \quad (3)$$

Donde:

T_{2km} : Temperatura a 2 km de profundidad [K]

q_{2km} : Flujo de calor por unidad de superficie a 2 km de profundidad $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

Por lo tanto, para poder estimar la temperatura de un yacimiento geotérmico, es necesario conocer la temperatura en la superficie terrestre de la zona bajo la que está situado, el flujo de calor por unidad de superficie en el exterior, el flujo de calor radiogénico por unidad de volumen, y la conductividad térmica del terreno.

El valor de la temperatura de la superficie se tomará como la temperatura media anual de la zona, dato que se puede obtener del Instituto Geográfico Nacional. En la FIGURA 23 se puede ver el mapa con la distribución de temperaturas medias anuales de España.

El flujo de calor por unidad de superficie en el exterior puede obtenerse de la TABLA 4. El flujo de calor radiogénico por unidad de volumen (\dot{q}) se debe a la presencia de isótopos radiactivos en la litosfera. Para poder estimarlo, de manera simplificada, se puede descomponer el flujo de calor por unidad de superficie del exterior (q_0) en la suma de dos componentes:

$$q_0 = q_M + q_r \quad (4)$$

El primero de ellos, q_M , es la contribución del manto terrestre a este flujo de calor, cuyo valor medio es $32 \frac{mW}{m^2}$. El segundo, se debe a la radiactividad de estos isótopos. Si se supone un espesor de 13 km para la capa de generación de dichos isótopos [15], q_r puede expresarse como:

$$q_r = 13000 \text{ m} \cdot \dot{q} \quad (5)$$

Por lo tanto, combinando (4) y (5) se obtiene la expresión para calcular el valor de \dot{q} :

$$\dot{q} = \frac{q_0 - q_M}{13000 \text{ m}} \quad (6)$$

Por último, la conductividad térmica de los materiales (k) que conforman la litosfera tiene un valor distinto para cada uno de estos materiales. Sin embargo, puede asumirse un valor de $2,50 \frac{W}{mK}$, el cual se ha utilizado en otros estudios, tanto de propósito general como centrados en la Península Ibérica [15].



Figura 23: Mapa de distribución de la temperatura media anual de la superficie en España. [16]

4.1.2. Profundidad y volumen del yacimiento

La influencia de la profundidad y el volumen en la selección del yacimiento están muy relacionadas una vez se encuentra una temperatura apropiada. Cuanto mayor sea la profundidad de los sondeos, mayores serán los costes de perforación y tecnológicos asociados. Por ello, se ha establecido que para que la explotación de un yacimiento geotérmico sea viable, su profundidad debe oscilar, aproximadamente, entre los 3 km y los 5 km de profundidad.

En cuanto al volumen, cuanto mayor sea este, mayor podrá ser la distancia entre los distintos sondeos, y, por lo tanto, menor será la interacción, por transferencia de calor por conducción, que se produzca entre ellos.

4.1.3. Permeabilidad del yacimiento

En los yacimientos con presencia de agua, la permeabilidad de este no es un problema en la mayor parte de los casos, ya que no hay que generar artificialmente dicha permeabilidad. Sin embargo, en aquellos yacimientos con ausencia de agua, como los HDR, hay que conseguir una permeabilidad suficiente como para que pueda hacerse circular la cantidad suficiente de fluido por ellos. Por otro lado, debe realizarse un gran control de fracturación que se efectúe con el objetivo de evitar que estas puedan alcanzar zonas fuera del yacimiento por las que pueda escapar el fluido, reduciendo la eficiencia de la central y afectando negativamente a los alrededores.

4.1.4. Conclusión

Aplicando el modelo para la estimación de la distribución de temperaturas en el rango de viabilidad económica de explotación, se obtienen los siguientes mapas con la distribución de temperaturas en el territorio peninsular, para profundidades de 3.500 m (FIGURA 24), 4.500 m (FIGURA 25) y 5.500 m (FIGURA 26).

Como puede verse, para las tres profundidades, el lugar más propicio, y donde se alcanzan las temperaturas más altas, para la instalación de una planta geotérmica de generación eléctrica es Galicia, más concretamente en el oeste de la provincia de Ourense. Se trata de una provincia privilegiada geotérmicamente hablando. Como ya se adelantó en el APARTADO 4.1.1., el flujo de calor por unidad de superficie gallego es el más alto de toda la península, con lo que es de esperar que bajo su superficie se encuentren los yacimientos geotérmicos de mayor temperatura y a menor profundidad. Su composición geológica, abundante en rocas graníticas, es la causante de este fenómeno, ya que se trata de rocas con presencia de uranio 238, un isótopo radioactivo cuya radiación contribuye al aumento del gradiente geotérmico de la zona. Se trata, además, de rocas muy poco permeables y con baja porosidad, con lo que se reduce la posibilidad de que penetre agua o cualquier otro fluido en el yacimiento, y, por lo tanto, también impediría las posibles fugas del fluido de trabajo que pudiesen producirse.

En cuanto a la tecnología, teniendo en cuenta la información de estos tres mapas junto a la de la FIGURA 10, un EGS sería lo más conveniente, al no poderse asegurar la presencia de agua en los yacimientos, sobre todo, teniendo en cuenta las características de las rocas del lugar.

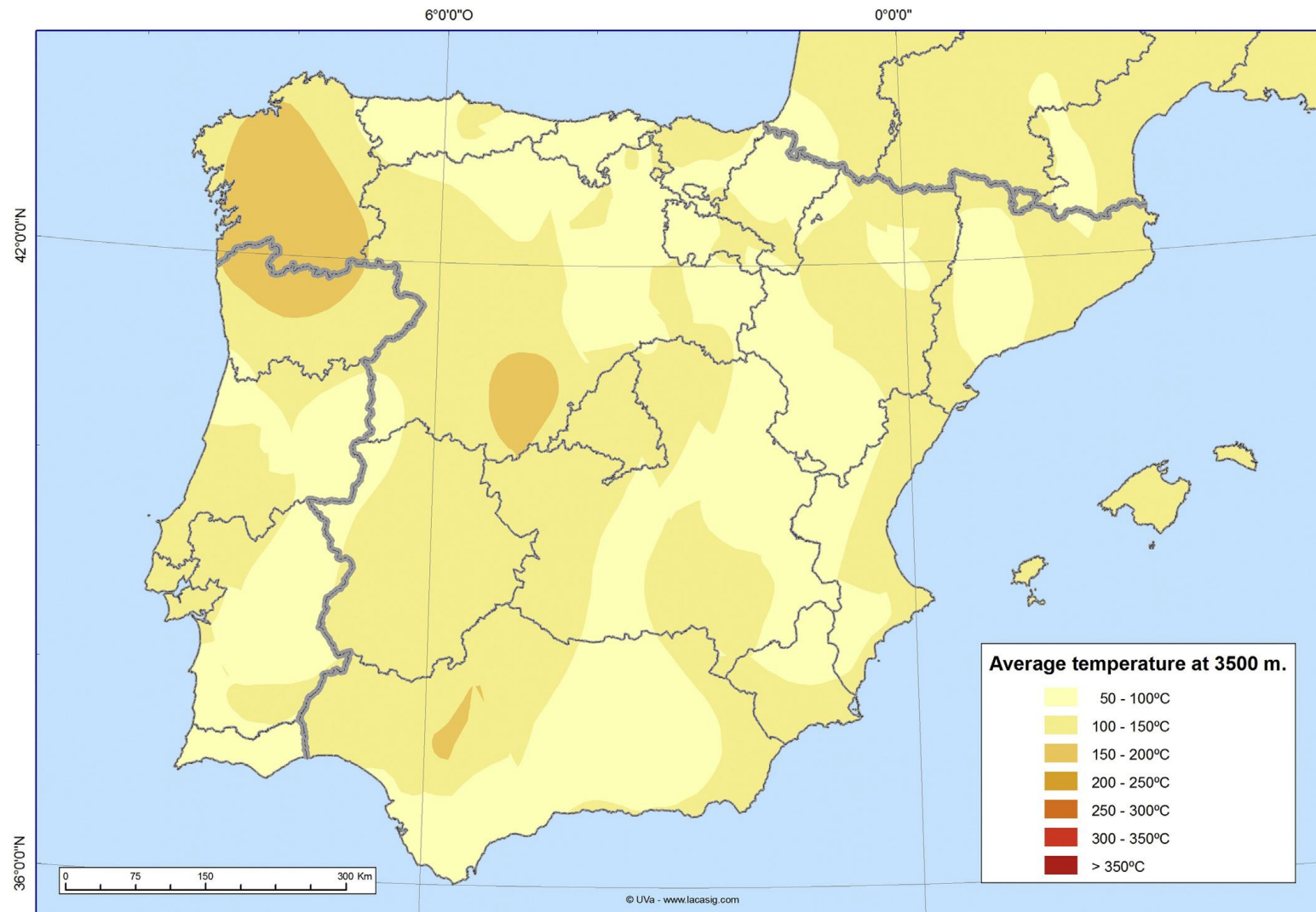


Figura 24: Mapa de temperaturas a 3.500 m de la Península Ibérica. [15]

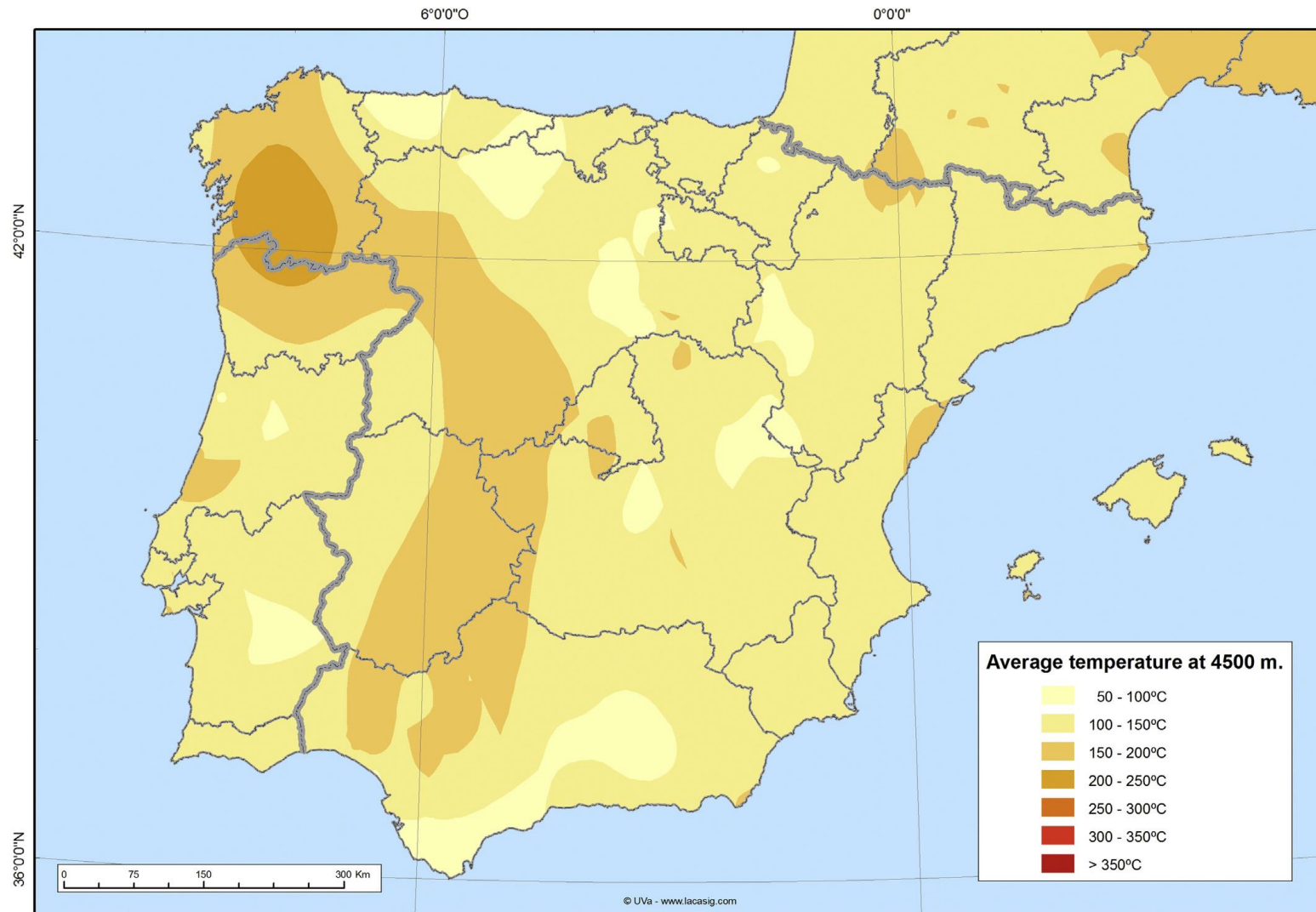


Figura 25: Mapa de temperaturas a 4.500 m de la Península Ibérica. [15]

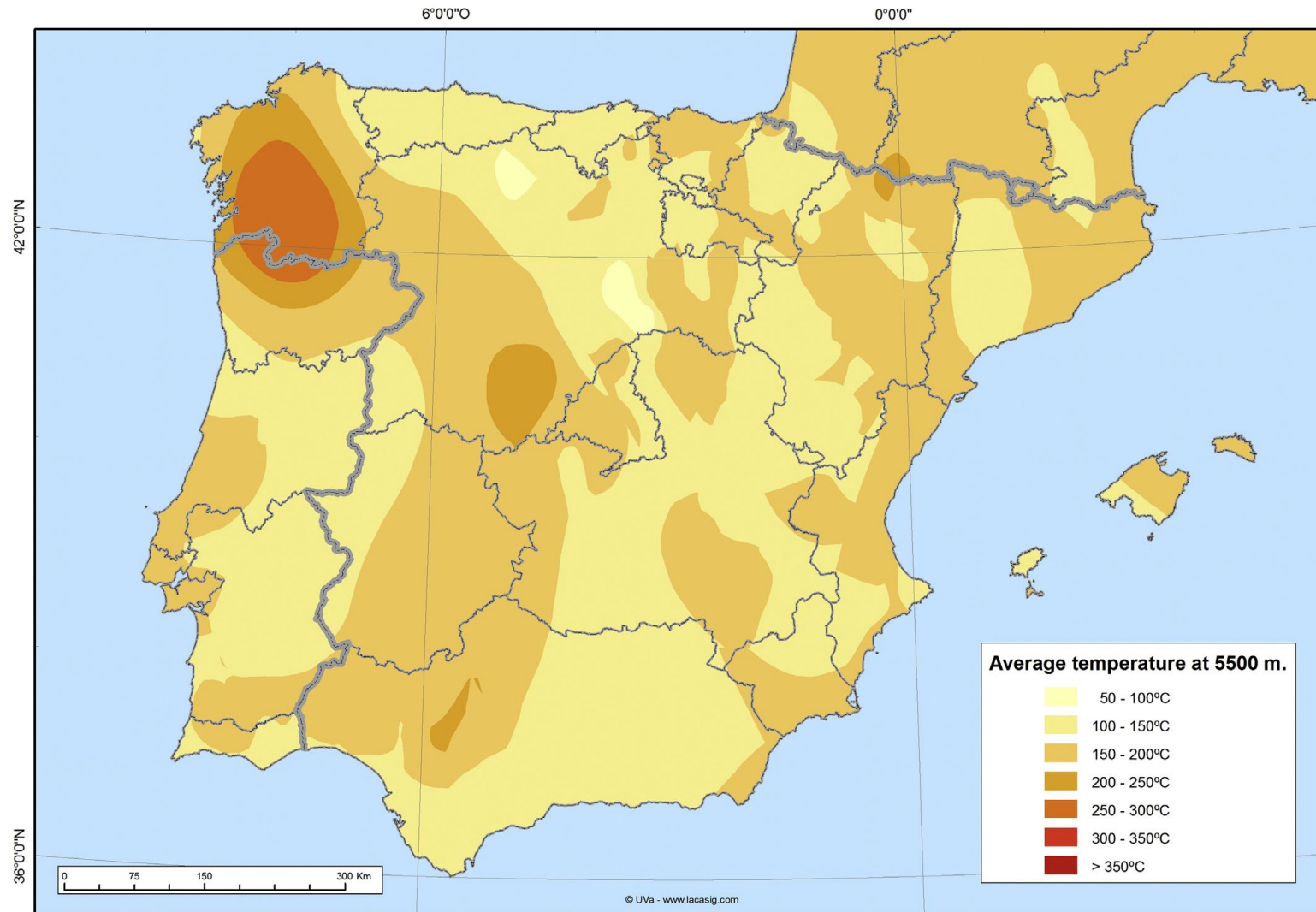


Figura 26: Mapa de temperaturas a 5.500 m de la Península Ibérica. [15]

4.2. Selección del ciclo termodinámico de producción de potencia

Una vez seleccionada la localización, pero, sobre todo, la tecnología, hay que definir el ciclo termodinámico a partir del cual la central va a generar energía eléctrica. Para poder elegir entre los ciclos de producción de potencia principales, Rankine y Brayton, o alguno de sus derivados, primero hay que decidir cuál va a ser el fluido de trabajo con el que va a operar la central.

4.2.1. Selección del fluido de trabajo

El fluido utilizado para la producción de potencia depende en gran medida de las características del yacimiento. En el caso de aquellos que albergan agua en su interior, las posibilidades quedan reducidas a usar esta agua como fluido de trabajo, ya que para poder usar otro fluido en su lugar habría que extraer primero el agua ya presente para evitar la posible interacción entre ambos fluidos. En el caso de yacimientos HDR, sin agua en su interior, hay que elegir el fluido que presente mejores características termodinámicas a las condiciones de presión y temperatura del propio yacimiento. Como se ha visto en apartados anteriores, los ciclos ORC y Kalina, que emplean hidrocarburos y amoníaco respectivamente, solo se utilizan para aprovechar recursos de baja y media temperatura, con lo que quedan descartados en este caso. Por otro lado, en el APARTADO 3.2.7.1. se han resumido brevemente las ventajas de usar CO₂ supercrítico frente a agua en los EGS. Estas se ven reflejadas en las siguientes gráficas, donde puede verse como las tasas de extracción de calor son mayores con el CO₂ que con el agua, aunque requiere un flujo másico mucho mayor de este gas.

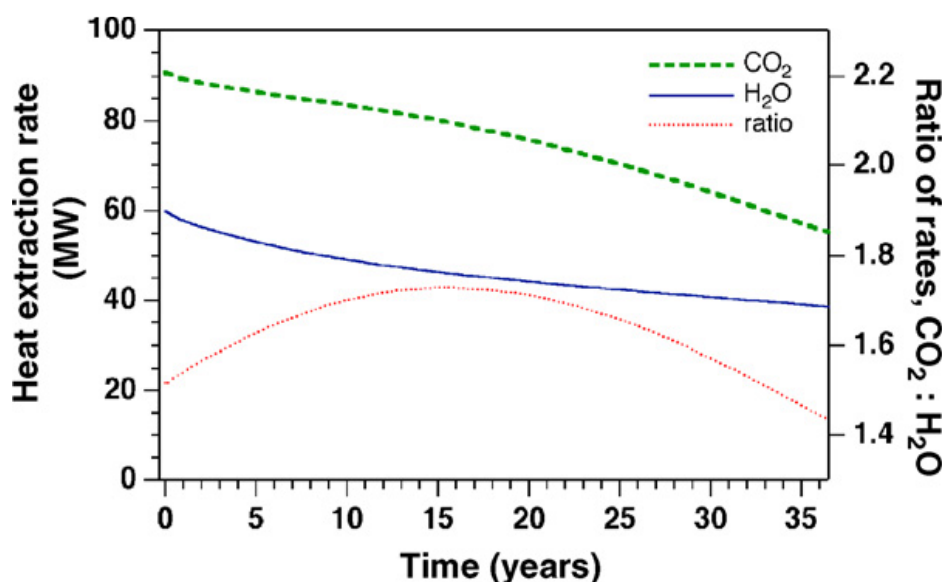


Figura 27: Comparación de las tasas de extracción de calor en un yacimiento con un pozo de inyección y cuatro pozos de producción usando agua y CO₂. [17]

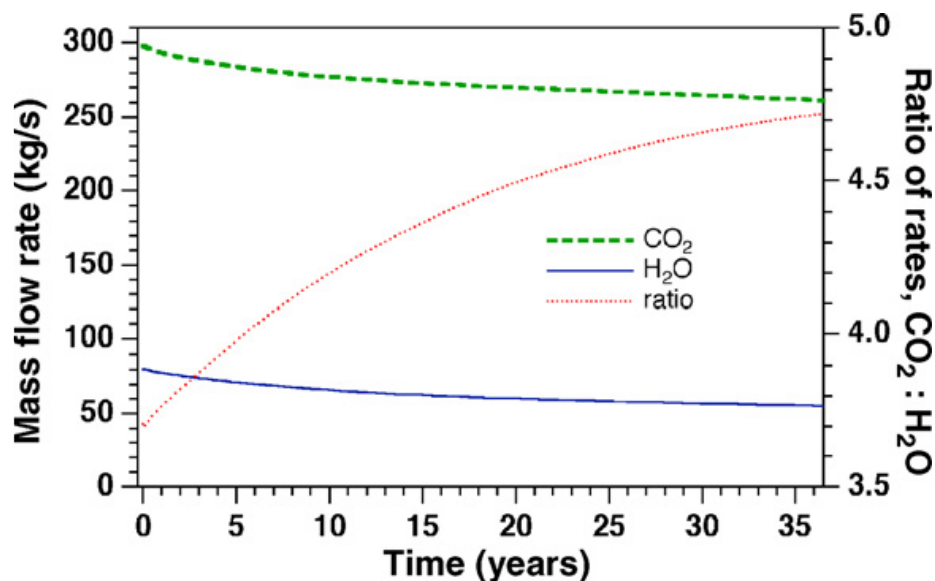


Figura 28: Comparación del flujo másico empleado en el yacimiento con un pozo de inyección y cuatro pozos de producción usando agua y CO₂. [17]

Esta diferencia, de entorno al 50%, en las tasas de extracción de calor del CO₂ frente a las del agua, hace que un ciclo Brayton de CO₂ resulte ventajoso, no solo para yacimientos donde se alcancen temperaturas elevadas, sino también en aquellos de menor temperatura, pero siendo esta suficiente para mantener el CO₂ en condiciones supercríticas. En consecuencia, se va a optar por operar la central con CO₂.

4.2.2. Ciclo Brayton simple

Para poder obtener trabajo a partir de un gas, se utilizan ciclos Brayton, o derivados del mismo. El ciclo Brayton más sencillo que se puede realizar es el ciclo Brayton simple, que consta de cuatro etapas:

1. Etapa 1-2: Compresión adiabática, aportando energía con un compresor.
2. Etapa 2-3: Calentamiento isobárico mediante un aporte de calor.
3. Etapa 3-4: Expansión adiabática, obteniéndose más energía, o trabajo, de la aportada en la compresión.
4. Etapa 4-1: Enfriamiento isobárico, cediendo calor al exterior.

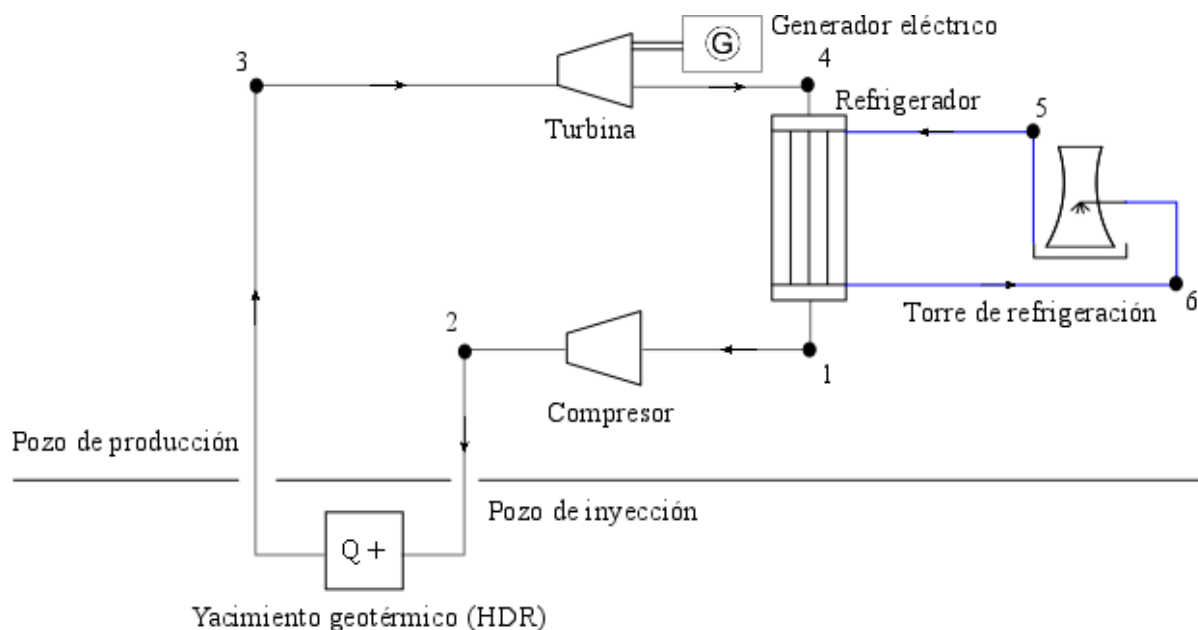


Figura 29: Esquema de funcionamiento de una central geotérmica con un ciclo Brayton simple. Elaboración propia.

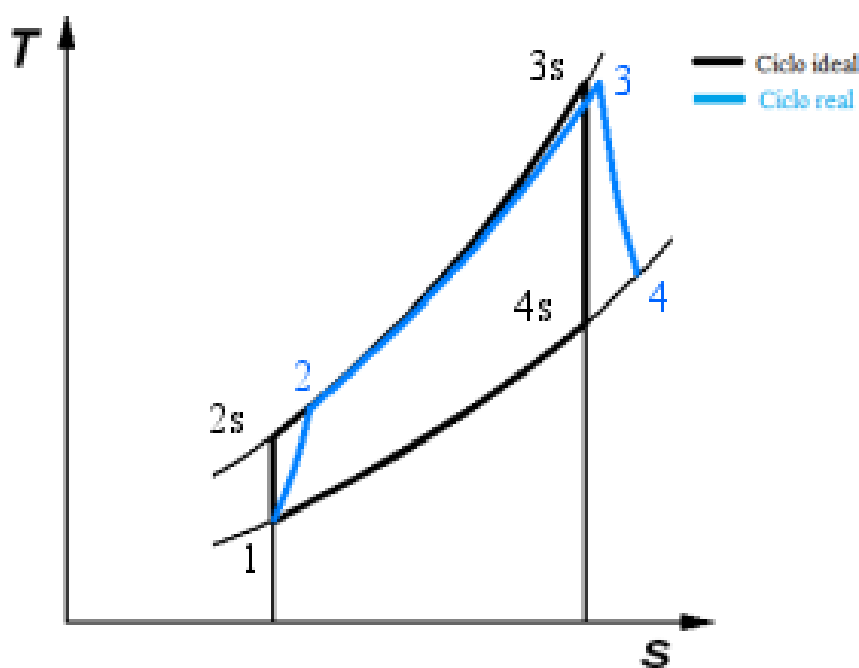


Figura 30: Diagrama T-s de un ciclo Brayton simple. Modificado de [18].

El rendimiento ($\eta_{B,s}$) de este ciclo puede expresarse de la siguiente forma:

$$\eta_{B,s} = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_c}{\dot{Q}_{abs}} = \frac{\dot{m}_{34}(h_3 - h_4) - \dot{m}_{12}(h_2 - h_1)}{\dot{m}_{23}(h_3 - h_2)} \quad (7)$$

Donde:

\dot{W}_t : Potencia suministrada por la turbina [W]

\dot{W}_c : Potencia consumida por el compresor [W]

\dot{Q}_{abs} : Potencia térmica absorbida por el gas [W]

\dot{m}_{ij} : Flujo másico de gas en el tramo $i - j$ $\left[\frac{kg}{s}\right]$

h_i : Entalpía específica del punto i $\left[\frac{J}{kg}\right]$

Como el circuito por el que circula el fluido es único, solo existe un flujo másico de gas ($\dot{m}_{ij} = \dot{m}$), con lo que la ecuación (7) queda de la siguiente forma:

$$\eta_{B,s} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \quad (8)$$

Si además el ciclo trabaja con un gas como el CO₂, al que se puede aplicar el modelo de gas ideal caloríficamente perfecto, es posible reemplazar el valor de las entalpías específicas por su definición ($h_i = c_p T_i$), con lo que el rendimiento del ciclo termina siendo únicamente función de las temperaturas:

$$\eta_{B,s} = \frac{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}{(T_3 - T_2)} \quad (9)$$

4.2.3. Mejoras del ciclo Brayton

4.2.3.1. Regeneración

El método más empleado para aumentar el rendimiento de un ciclo Brayton es la regeneración. Consiste en aprovechar el calor de los gases a la salida de la turbina para calentar el fluido después de su compresión, de forma que el calor cedido al ambiente a través del sistema de refrigeración sea el menor posible. Para ello se utiliza un intercambiador de calor adicional, como se muestra en la FIGURA 31.

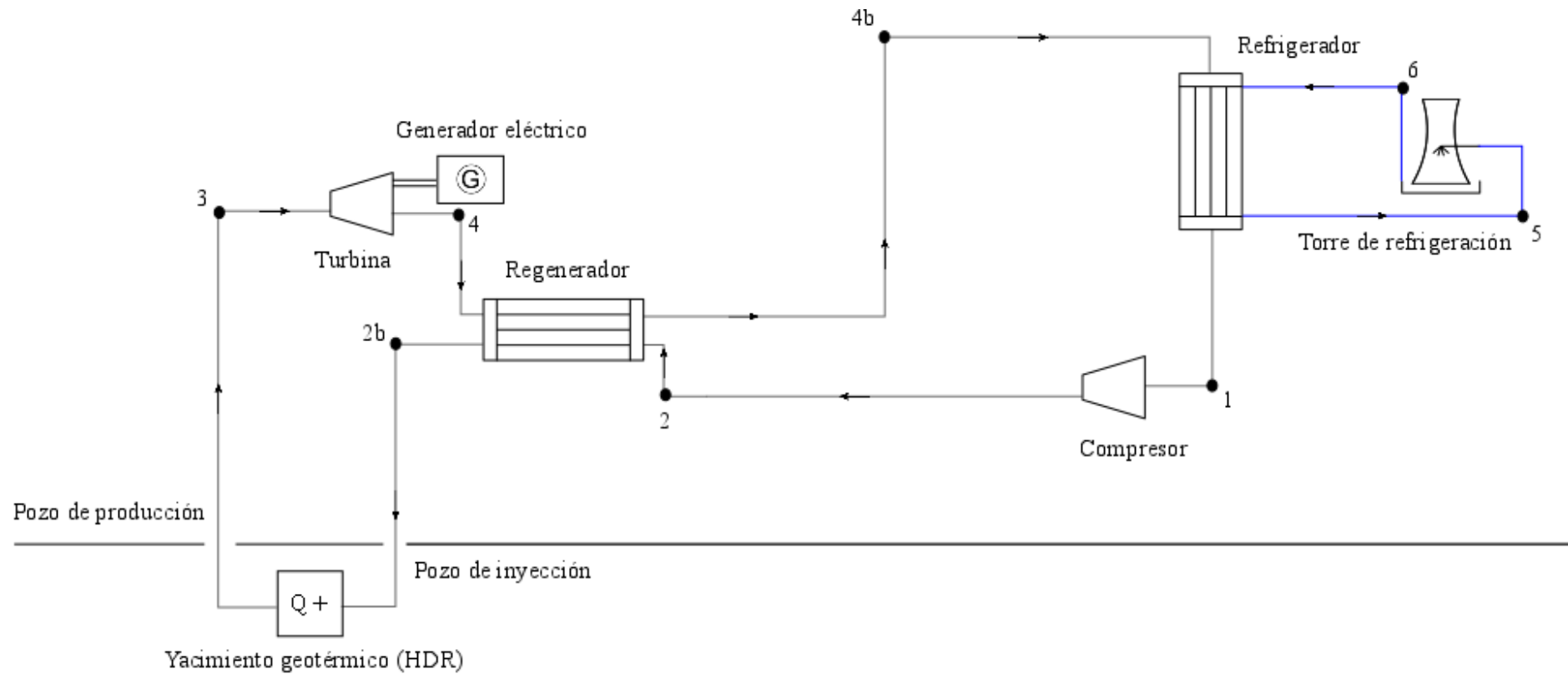


Figura 31: Esquema de funcionamiento de una central geotérmica con un ciclo Brayton con regeneración. Elaboración propia.

Si se representa este ciclo en un diagrama T-s se obtiene lo siguiente:

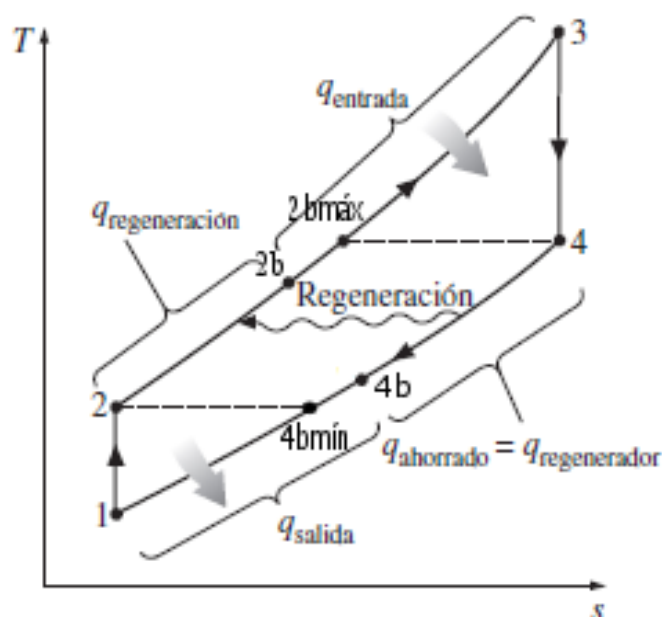


Figura 32: Diagrama T - s de un ciclo Brayton ideal con regeneración. Modificado de [19].

En este caso, teniendo en cuenta que el flujo másico es único, y aplicando el modelo de gas ideal, el rendimiento del ciclo puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_{B,Reg} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_{2h})} = \frac{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}{(T_3 - T_{2h})} \quad (10)$$

Puesto que $T_2 \leq T_{2b} \leq T_4$, el rendimiento de un ciclo Brayton con regeneración aumenta con respecto a uno simple, siempre que la temperatura a la salida del compresor sea menor que la temperatura a la salida de la turbina de gas.

4.2.3.2. Interenfriamiento

El interenfriamiento consiste en dividir la etapa de compresión en dos o más etapas, entre las cuales se enfría el fluido, de forma que la temperatura de entrada a cada compresor sea aproximadamente la misma. De esta forma se consigue mantener el gas a menor temperatura, con lo que presenta mayor densidad y es más fácil aumentar su presión, y por lo tanto, disminuye el trabajo que tienen que realizar los compresores. Además, se puede minimizar dicho trabajo si se usa la misma relación de presiones en todas las etapas de la compresión. Se ha demostrado experimentalmente que este método por sí solo no aumenta el rendimiento del ciclo, sino que tiende a disminuirlo, ya que, aunque reduce el trabajo consumido en la compresión, requiere de un mayor aporte de calor para alcanzar la misma temperatura en la turbina (FIGURA 33). Sin embargo, combinando el interenfriamiento con la regeneración, no solo no reduce el rendimiento del ciclo, sino que, en la mayoría de los casos, aumenta el rendimiento aún más que si solamente se realiza la regeneración, ya que, al disminuir la temperatura a la salida de los compresores, se aprovecha más aún el calor de los gases a la salida de la turbina en el regenerador. En la FIGURA 35 se muestra un ejemplo de ciclo con regeneración y una etapa de interenfriamiento.

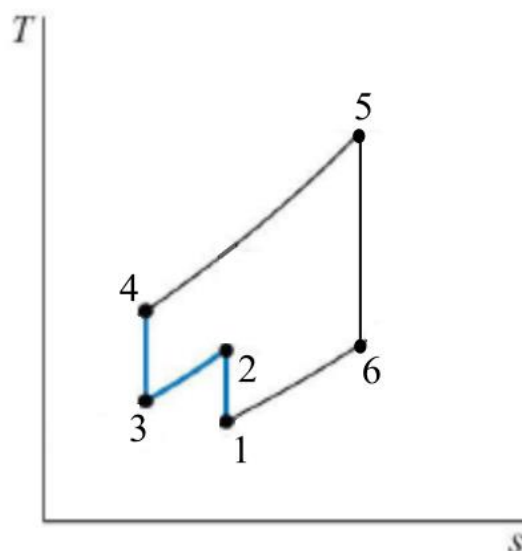


Figura 33: Diagrama T - s de un ciclo Brayton ideal, sin regeneración, con una etapa de interenfriamiento. Modificado de [20].

El diagrama T-s de un ciclo ideal de este tipo resulta ser el siguiente:

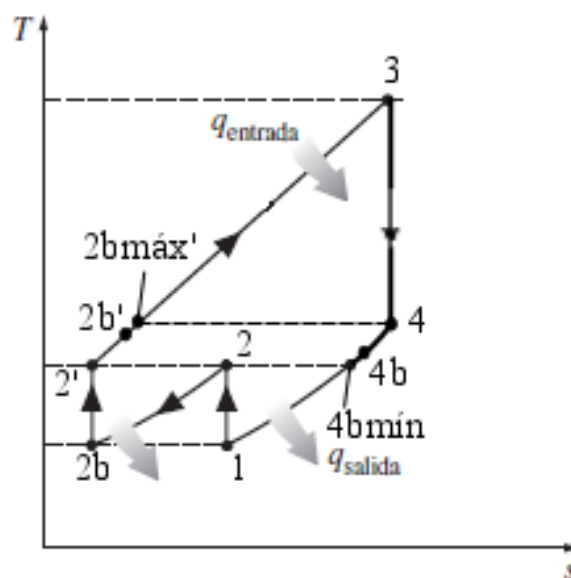


Figura 34: Diagrama T-s de un ciclo Brayton ideal con regeneración y una etapa de interenfriamiento. Modificado de [19].

Asumiendo las condiciones de unicidad en el flujo másico y de gas ideal, se obtiene la expresión del rendimiento de este ciclo:

$$\eta_{B,Reg+Inter} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1) - (h_{2'} - h_{2b})}{(h_3 - h_{2b'})} \quad (11)$$

$$\eta_{B,Reg+Inter} = \frac{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1) - (T_{2'} - T_{2b})}{(T_3 - T_{2b'})} \quad (12)$$

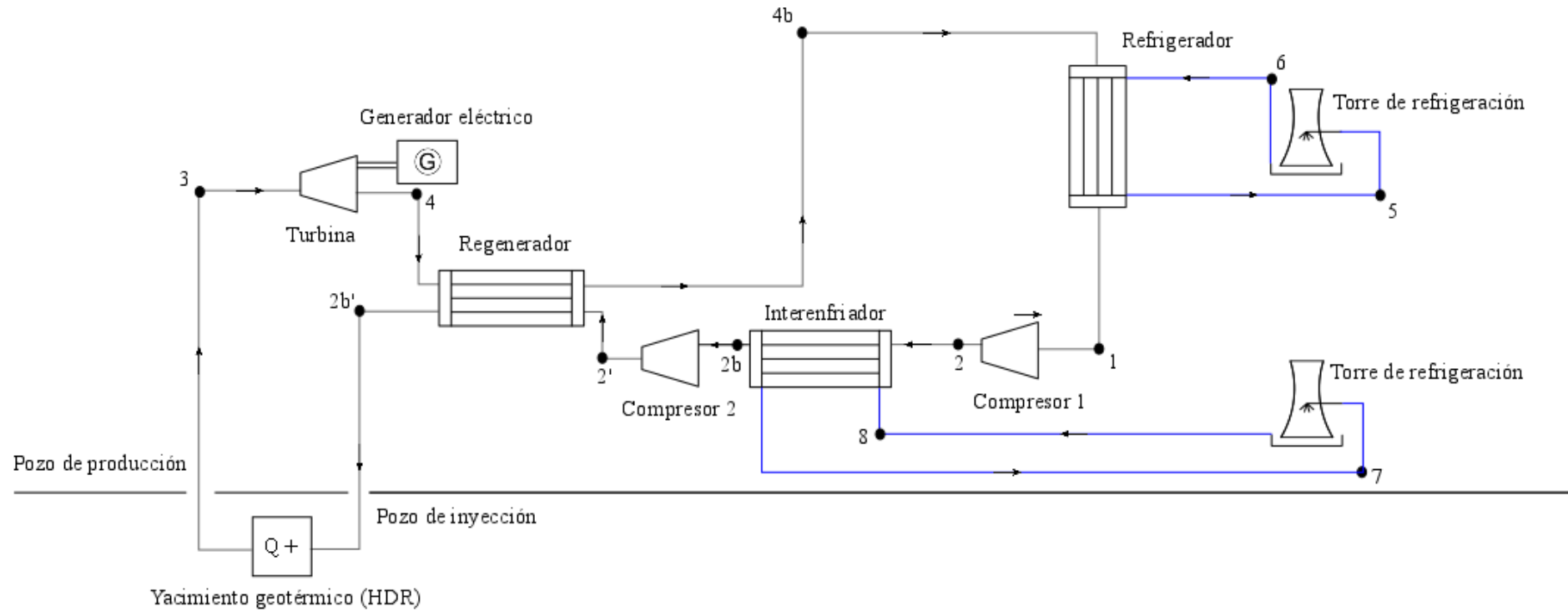


Figura 35: Esquema de funcionamiento de una central geotérmica con un ciclo Brayton con regeneración y una etapa de interenfriamiento. Elaboración propia.

4.2.3.3. Recalentamiento

El recalentamiento tiene como objetivo realizar la expansión del gas en varias etapas (varias turbinas) entre las cuales dicho gas es calentado de forma que la temperatura de entrada a cada turbina es la misma para todas ellas. De esta forma, al contrario que con el interenfriamiento en los compresores, con el gas a mayor temperatura se logra disminuir su densidad, con lo que se obtiene más trabajo con la suma de varias expansiones que con una sola. Al igual que como ocurría con el interenfriamiento, este método, por sí solo, no aumenta el rendimiento del ciclo, sino que tiende a disminuirlo, al ser mayor el nuevo aporte de calor necesario para el recalentamiento que la diferencia de potencia extraída de las turbinas. Además, al trabajar en cada etapa a una temperatura más alta (sin superar la temperatura máxima del ciclo inicial) con una relación de presión menor, los gases de salida de las turbinas salen más calientes, con lo que el calor cedido al ambiente a través de los sistemas de refrigeración también aumenta, lo que baja el rendimiento (FIGURA 36). Para poder implementar un sistema de recalentamiento y que aumente el rendimiento del ciclo, es necesario combinarlo con un sistema de regeneración que aproveche el calor extra de los gases a la salida de la última turbina para calentar los de la salida del compresor, con lo que se reduce el calor absorbido de la fuente, aún más que si solamente se utiliza la regeneración. La FIGURA 37 muestra un ejemplo de central con un ciclo con regeneración y una etapa de recalentamiento:

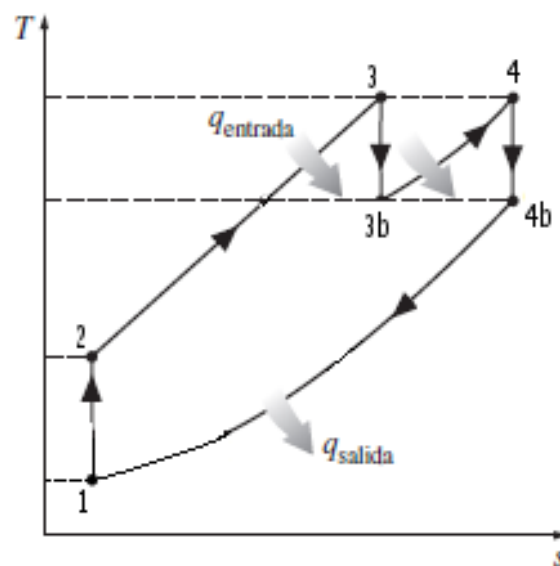


Figura 36: Diagrama T-s de un ciclo Brayton ideal, sin regeneración, con una etapa de recalentamiento. Modificado de [19].

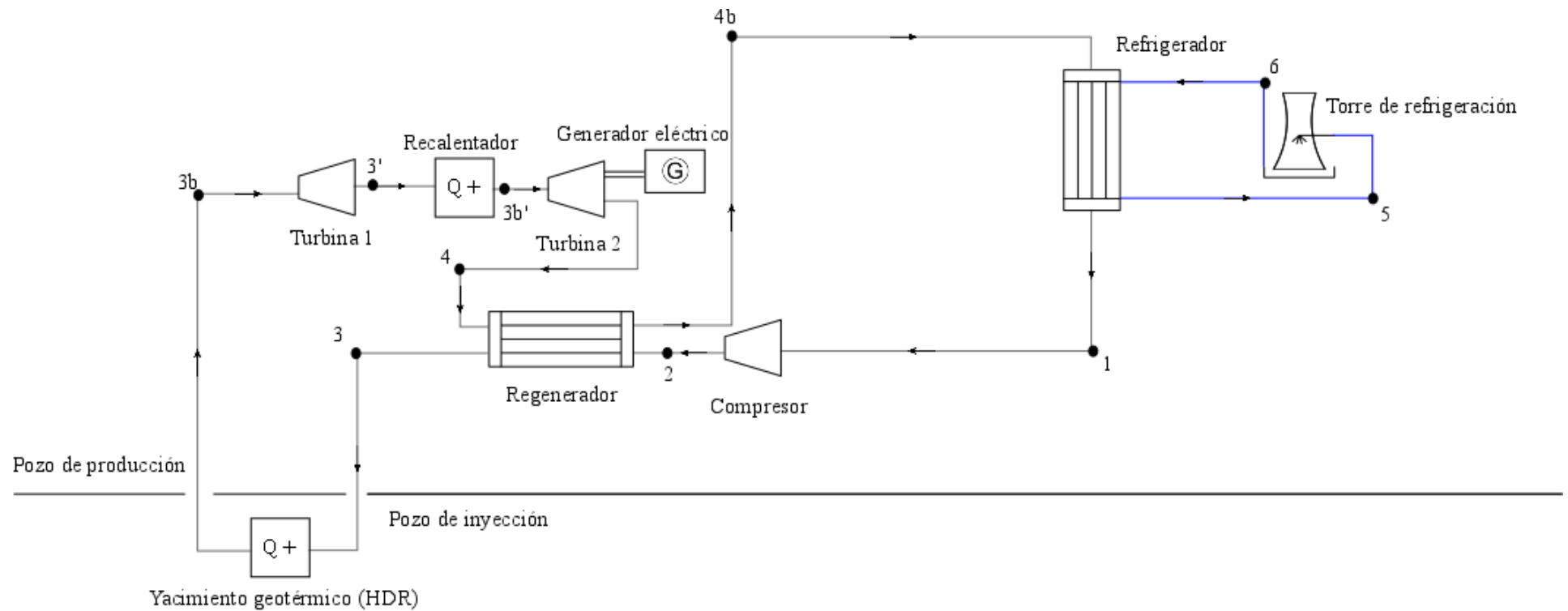


Figura 37: Esquema de funcionamiento de una central geotérmica con un ciclo Brayton con regeneración y una etapa de recalentamiento. Elaboración propia.

Como puede verse, el recalentamiento, en este caso, por tratarse de energía geotérmica, no puede realizarse en el propio yacimiento, ya que la presión de salida de la primera turbina, desde la que comienza la expansión en la segunda, siempre será menor que la de dicho yacimiento. No obstante, el recalentamiento podría realizarse haciendo uso de otras tecnologías que utilicen otras fuentes de energía. Por ejemplo, podrían usarse colectores solares para recalentar el fluido hasta la temperatura de entrada de la segunda turbina.

En la siguiente figura se muestra el diagrama T-s de un ciclo ideal de este tipo:

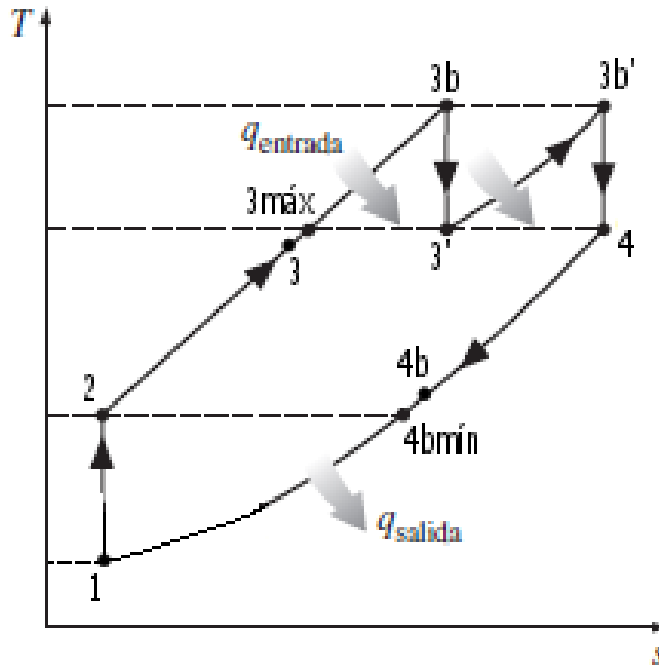


Figura 38: Diagrama T-s de un ciclo Brayton ideal con regeneración y una etapa de recalentamiento. Modificado de [19].

El rendimiento de este ciclo puede escribirse como:

$$\eta_{B,Reg+Recal} = \frac{(h_{3b} - h_{3'}) + (h_{3b'} - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_{3b} - h_3) + (h_{3b'} - h_{3'})} \quad (13)$$

$$\eta_{B,Reg+Recal} = \frac{(T_{3b} - T_{3'}) + (T_{3b'} - T_4) - (T_2 - T_1)}{(T_{3b} - T_3) + (T_{3b'} - T_{3'})} \quad (14)$$

4.2.3.4. Regeneración, interenfriamiento y recalentamiento

En los dos apartados anteriores ya se ha visto que resulta imprescindible realizar el interenfriamiento y el recalentamiento junto con un proceso de regeneración para que estos, en vez de reducir el rendimiento del ciclo Brayton, lo aumenten. Sin embargo, existe la posibilidad de combinar estos tres procesos y conseguir un ciclo termodinámico con un rendimiento todavía mayor. Al realizar recalentamiento e interenfriamiento a la vez, la diferencia entre la temperatura de la salida de la última turbina y la temperatura de salida del último compresor aumenta, con lo que el calor que puede ser recuperado en la regeneración es mayor, con lo que aumenta el rendimiento del ciclo. El esquema de la central, por lo tanto, quedaría de la siguiente forma:

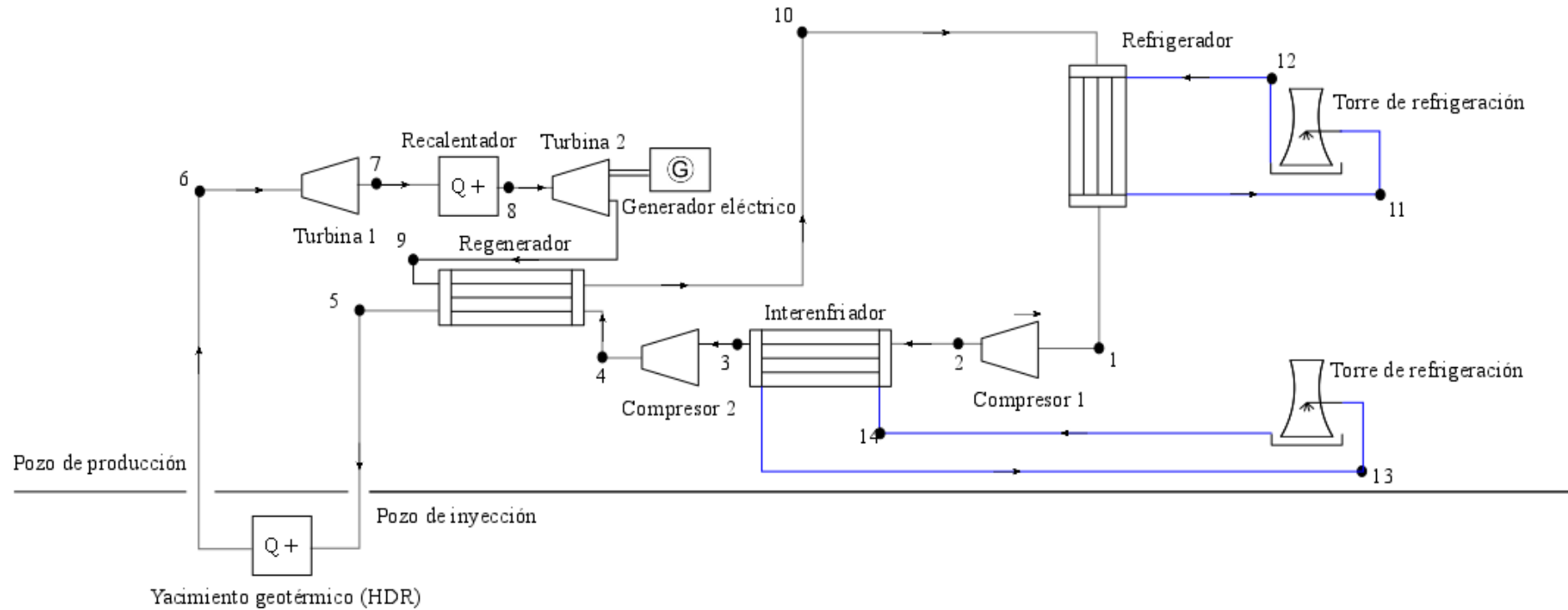


Figura 39: Esquema de funcionamiento de una central geotérmica con un ciclo Brayton con regeneración, una etapa de interenfriamiento y una etapa de recalentamiento. Elaboración propia.

El diagrama T-s correspondiente a este ciclo y el rendimiento asociado a este son los siguientes:

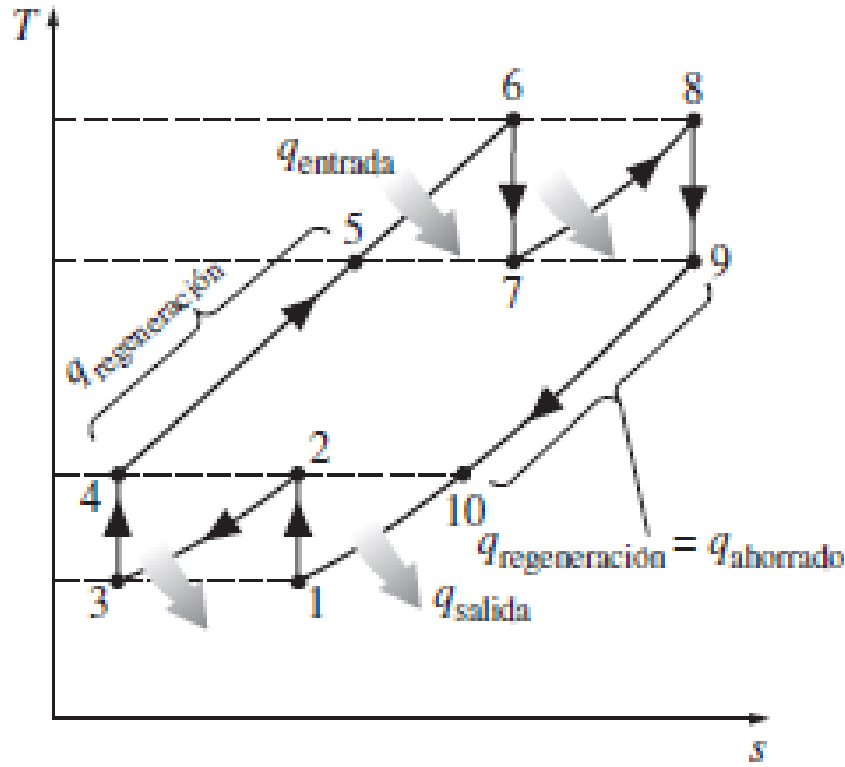


Figura 40: Diagrama T-s de un ciclo Brayton ideal con regeneración, una etapa de interenfriamiento y una etapa de recalentamiento. [19]

$$\eta_{B,Reg+Inter+Recal} = \frac{(h_7 - h_6) + (h_9 - h_8) - (h_2 - h_1) - (h_4 - h_3)}{(h_6 - h_5) + (h_8 - h_7)} \quad (15)$$

$$\eta_{B,Reg+Inter+Recal} = \frac{(T_7 - T_6) + (T_9 - T_8) - (T_2 - T_1) - (T - T_3)}{(T_6 - T_5) + (T_8 - T_7)} \quad (16)$$

4.3. Reducción de la temperatura del yacimiento geotérmico

Uno de los principales aspectos a tener en cuenta en el diseño es el agotamiento térmico del yacimiento geotérmico que será el que marque principalmente el tiempo de vida útil de la planta.

Los yacimientos geotérmicos están recibiendo constantemente calor del interior terrestre, pero una tasa de extracción de calor muy elevada podría conllevar a su agotamiento, con lo que la central quedaría inutilizada. La potencia extraída puede regularse a través del flujo másico de CO₂ que circule por el ciclo. Por ello, es necesario estudiar los efectos de dicho flujo sobre la temperatura del yacimiento a lo largo del tiempo para poder determinar la cantidad de fluido óptima que permita obtener un mayor beneficio económico. Para ello se van a usar los resultados obtenidos por Biagi, Agarwal y Zhang [21].

El estudio tiene como objetivo la simulación y optimización de un sistema geotérmico estimulado usando CO₂ como fluido de trabajo, aunque también se comparan algunos de los resultados con los que se obtendrían usando agua como fluido de trabajo. Para ello, se hace uso del código numérico de simulación TOUGH2, un programa de simulación de flujos multifase, multicomponente, y tridimensional en medios porosos y con fracturas. El programa tiene además datos sobre las propiedades de los fluidos que se pueden encontrar típicamente en los distintos tipos de yacimientos geológicos.

La simulación se realiza sobre un yacimiento de referencia con 1 pozo de inyección y 4 pozos de producción, como el que se muestra en la siguiente figura:

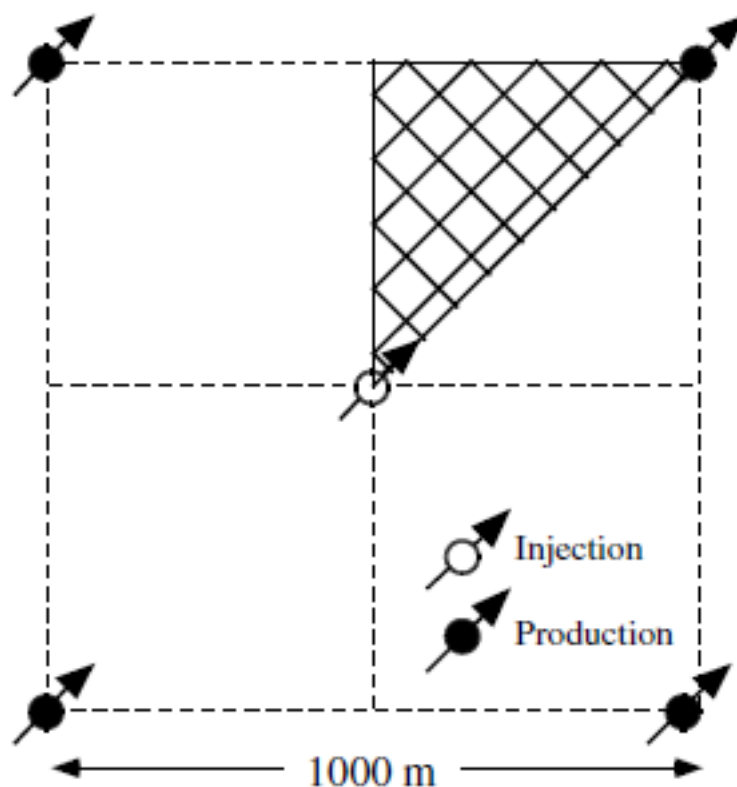


Figura 41: Representación del área del yacimiento de referencia para la simulación. El mallado está realizado en 1/8 de la superficie. [21]

Puede verse como la simulación se realiza únicamente sobre el volumen correspondiente a la superficie mallada, con lo que los resultados para el volumen total se obtienen multiplicando por 8 los resultados de la simulación. Se han definido, además, los siguientes parámetros del yacimiento:

Formación	
Espesor [m]	305
Distancia entre fracturas [m]	50
Fracción de volumen permeable [%]	2
Permeabilidad [m²]	$50 \cdot 10^{-15}$
Porosidad en el dominio permeable* [%]	50
Densidad de la roca [kg/m³]	2650
Calor específico de la roca [J/(kgK)]	1000
Conductividad térmica de la roca [W/(mK)]	2,1
Condiciones iniciales	
Fluido en el yacimiento	Todo CO ₂ o todo agua
Temperatura [°C]	200
Presión [bar]	45-500
Producción/Inyección	
Área [km²]	1
Distancia inyector-productor [m]	707,1
Temperatura de inyección [°C]	20
Presión de inyección [bar]	Presión inicial + 10 bar
Presión de producción [bar]	Presión inicial - 10 bar

* Se han incluido algunas paredes de rocas en la definición del dominio fracturado

Tabla 5: Parámetros del yacimiento de referencia usados en la simulación. Modificado de [22].

En primer lugar, se obtienen los perfiles de flujo másico y de potencia extraída para los distintos niveles de presión considerados, y se comparan con los obtenidos por Pruess [22] (FIGURA 42), donde pueden apreciarse grandes similitudes con perfiles casi idénticos, donde las diferencias podrían deberse al uso de perfiles de inyección ligeramente distintos.

A partir de estos resultados, el perfil correspondiente a una presión en el yacimiento de 200 bar resulta ser el más ventajoso, y el que a priori permitiría obtener mayores potencias durante más tiempo. Por ello, se obtiene el perfil de temperaturas de producción de la FIGURA 44 solamente para dicha presión.

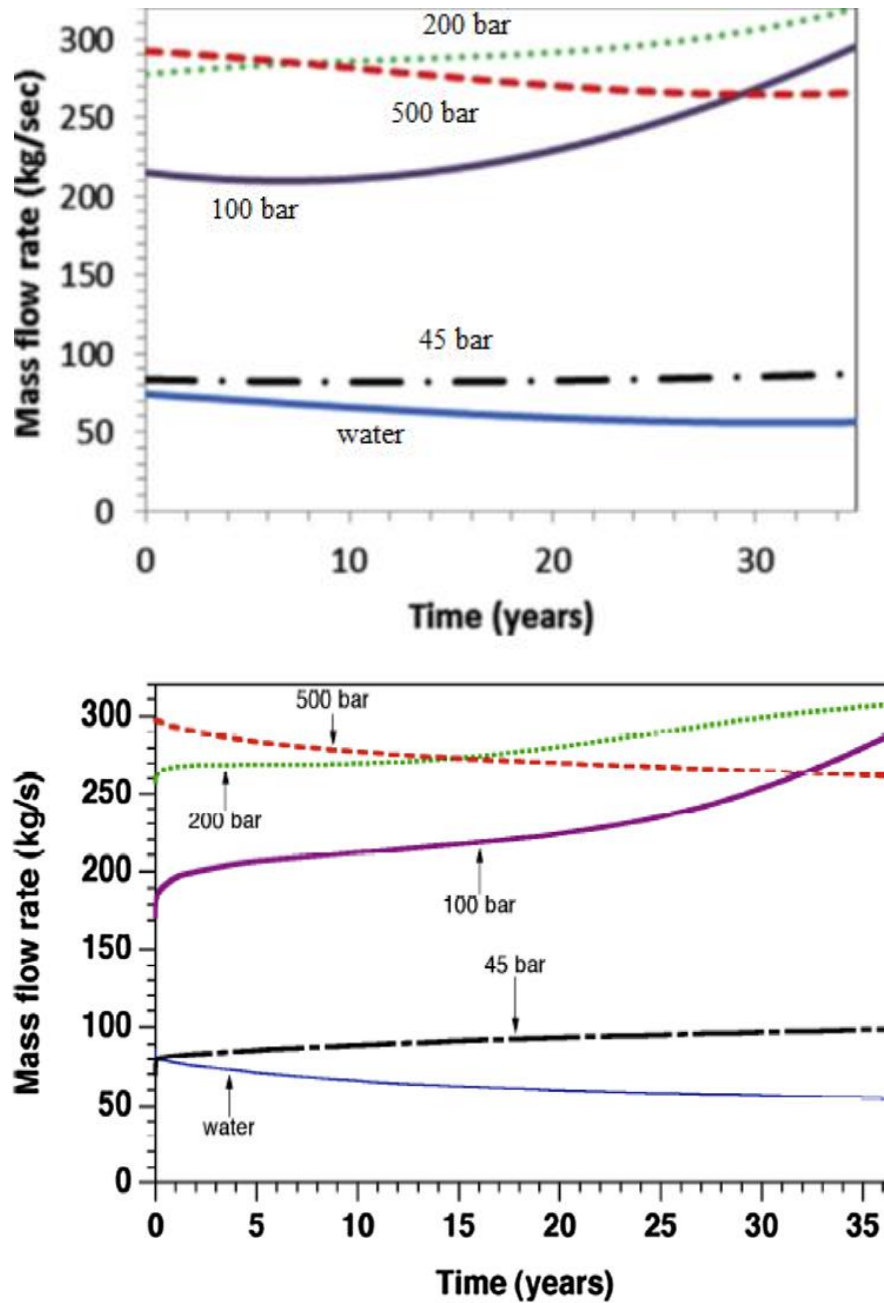


Figura 42: Perfiles de flujo másico, de CO₂ para los distintos niveles de presión de yacimiento indicados, y de agua, obtenidos usando GA-TOUGH2 (arriba) y por Pruess (abajo) [22]. Modificado de [21].

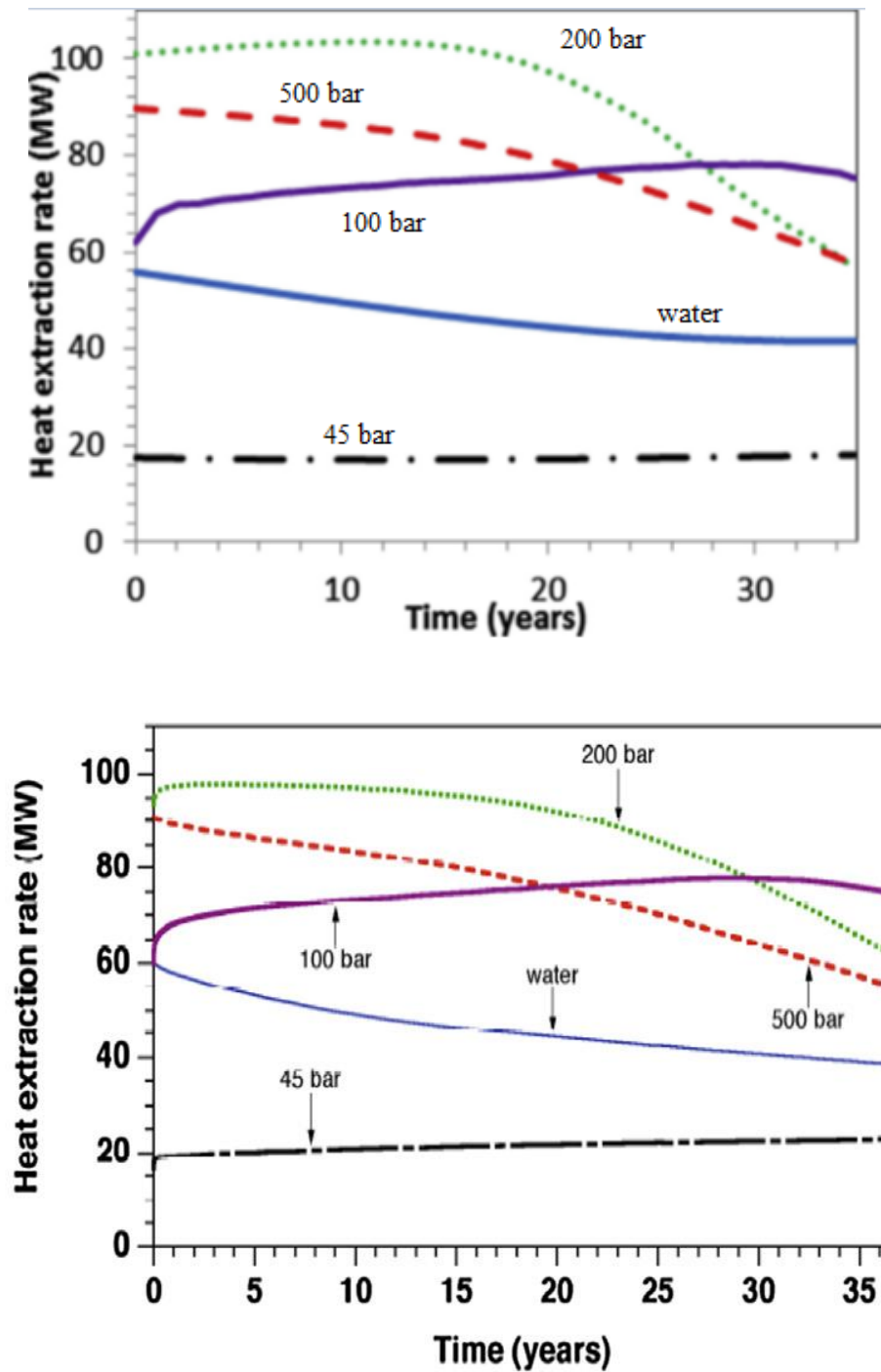


Figura 43: Perfiles de potencia extraída, por el CO₂ para los distintos niveles de presión de yacimiento indicados, y por el agua, obtenidos usando GA-TOUGH2 (arriba) y por Pruess (abajo) [22]. Modificado de [21].

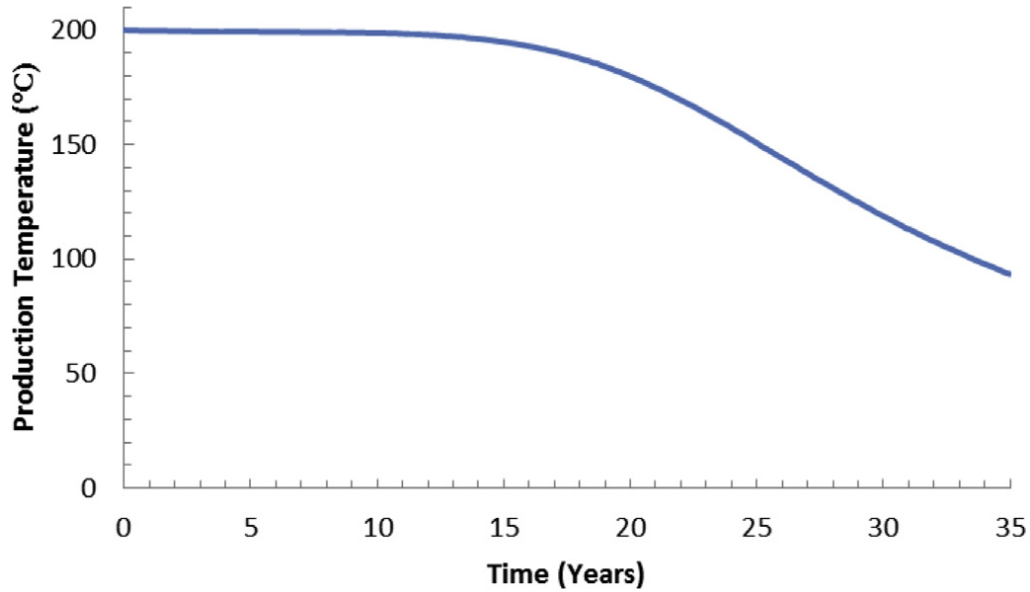


Figura 44: Perfil de temperaturas de producción a 200 bar. [21]

La forma de estos perfiles se puede justificar atendiendo a como varían la movilidad del fluido y su entalpía con la presión y la temperatura. La movilidad se define de la siguiente forma:

$$m = \frac{Kk_i}{\mu_i} \quad (17)$$

Siendo m la movilidad del fluido, K la permeabilidad intrínseca de la formación geológica, k_i la permeabilidad relativa del fluido y μ_i la viscosidad dinámica del fluido.

En cuanto a la entalpía, esta se define como:

$$H = U + pV \quad (18)$$

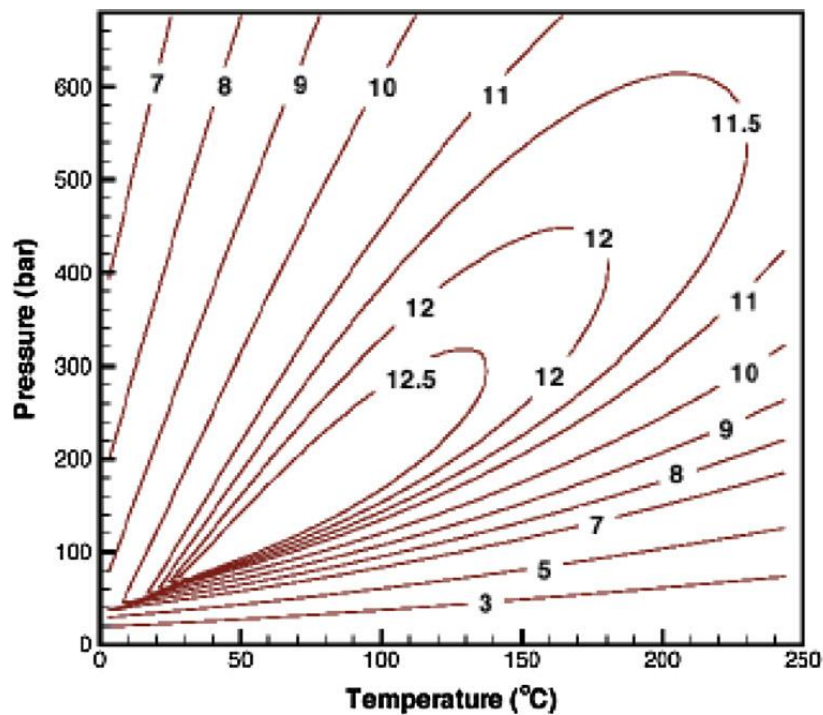
Donde H es la entalpía, U su energía interna, p la presión y V el volumen, todos ellos referidos al fluido con el que se está trabajando. Suele emplearse más comúnmente la definición de entalpía específica, que se obtiene del cociente de la entalpía del fluido y su masa:

$$h = u + pv \quad (19)$$

Siendo, por tanto, h la entalpía específica, u la energía específica y v el volumen específico o densidad del fluido.

En la FIGURA 45 y FIGURA 46 puede verse la variación de estas dos propiedades, movilidad y entalpía específica respectivamente, con la temperatura y presión, tanto para el caso del CO₂ como para el agua.

Movilidad del CO₂



Movilidad del agua

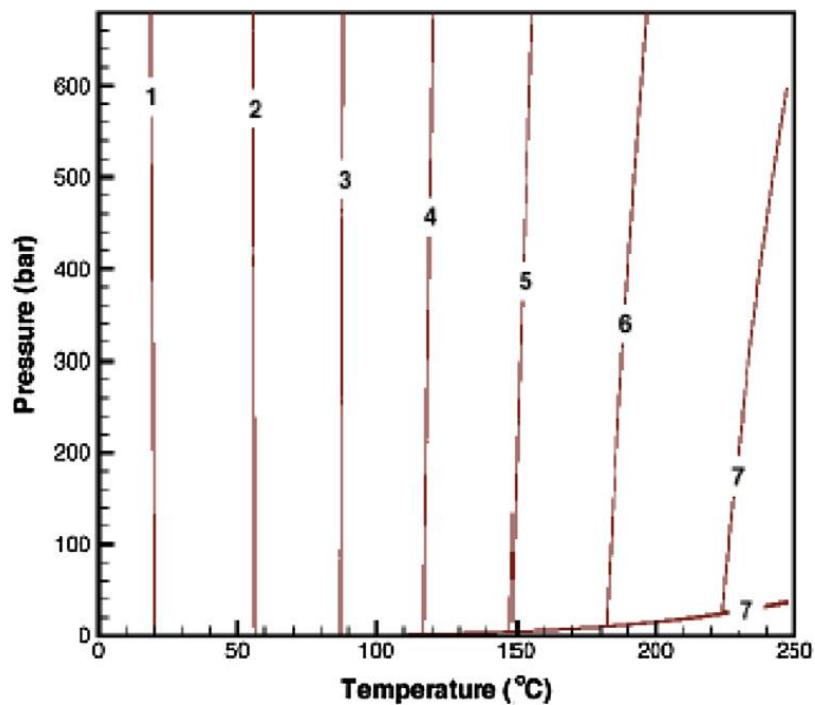
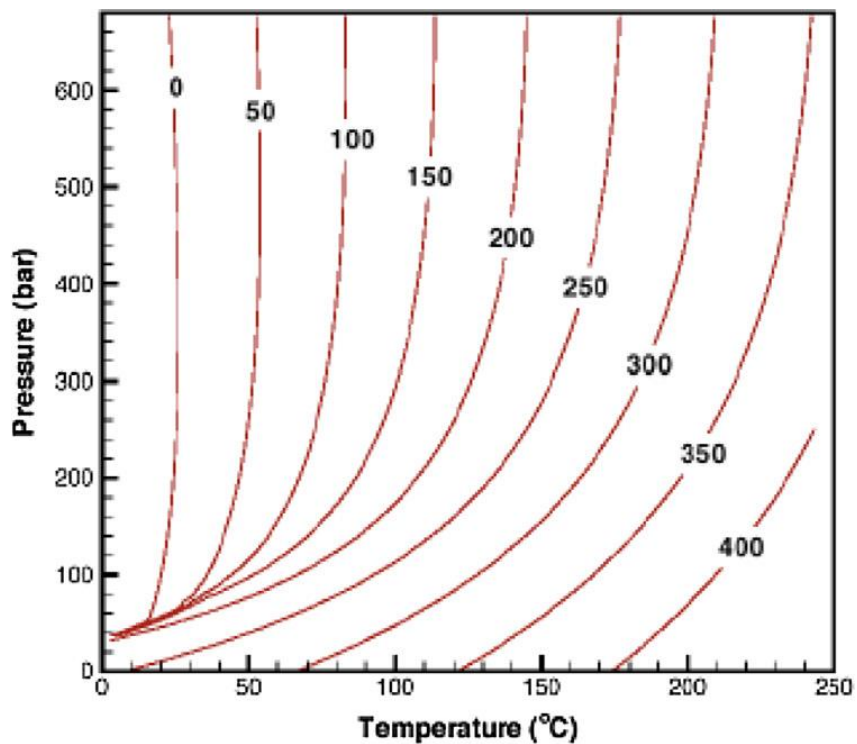


Figura 45: Movilidad del CO₂ (arriba) y del agua (abajo) en unidades de 10^6 sm^{-2} . [21]

Entalpía específica del CO₂



Entalpía específica del agua

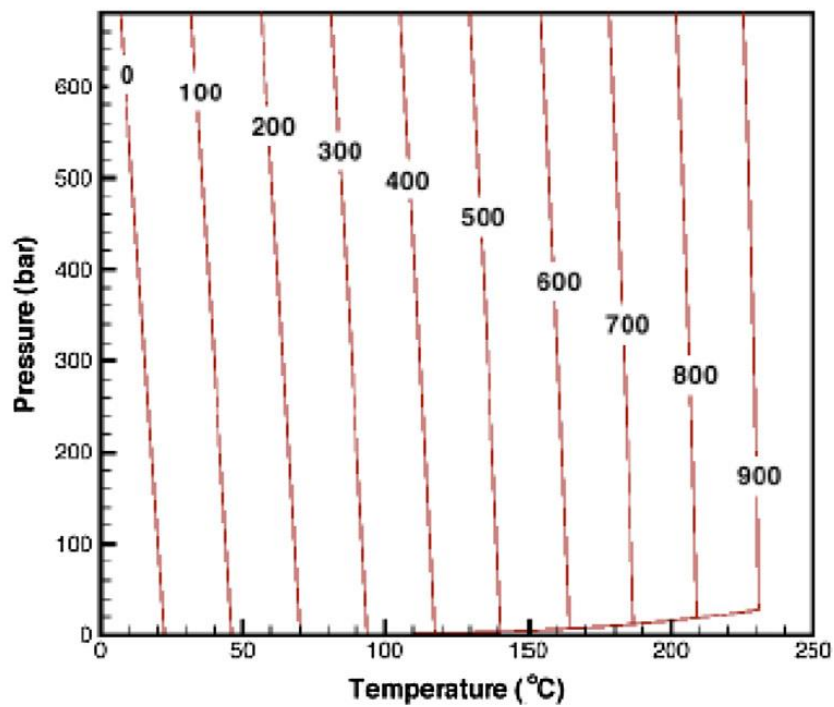


Figura 46: Entalpía específica del CO₂ (arriba) y del agua (abajo) en kJ/kg. [21]

La FIGURA 44 muestra como la temperatura del yacimiento comienza a decaer a partir de los primeros 15 años de explotación. Esto debería afectar inmediatamente a la potencia que el fluido, el CO₂ en este caso, es capaz de extraer, ya que se reduce su entalpía (FIGURA 46). Sin embargo, al enfriarse, el CO₂ en condiciones supercríticas aumenta su movilidad, como puede verse en la FIGURA 45, lo cual permite aumentar la cantidad de fluido que circula por el ciclo y mantener la potencia extraída constante durante otros 5 años aproximadamente. A partir de este momento, cuando la temperatura decae de los 150°C, el aumento en la movilidad del CO₂ disminuye drásticamente, con lo que el aumento de la cantidad de fluido que circula por el ciclo no puede compensar la caída de temperatura y la potencia extraída empieza también a bajar. El límite del gráfico de temperatura está en 100°C. Este límite no es arbitrario, sino que por debajo de esta temperatura la movilidad del CO₂ empieza a disminuir, con lo que habría que reducir la cantidad de fluido por segundo que circula por el sistema para poder seguir moviéndolo con relativa facilidad. Esto conllevaría a una disminución cada vez más rápida de la potencia extraída del yacimiento.

Para poder, por lo tanto, obtener la mayor potencia durante el mayor tiempo posible, habrá que mantener una presión de inyección de 200 bar e ir regulando el flujo másico de CO₂ según vaya bajando la temperatura del yacimiento. El perfil obtenido es el representado en la FIGURA 47, en el que se puede ver como durante los 10 primeros años, durante los cuales la temperatura disminuye apenas unos grados, el perfil de inyección disminuye mínimamente desde su valor inicial, de en torno a 276 kg/s, hasta que la presión en el interior del yacimiento se estabiliza. A partir de entonces, el flujo de CO₂ aumenta como consecuencia del descenso de la temperatura.

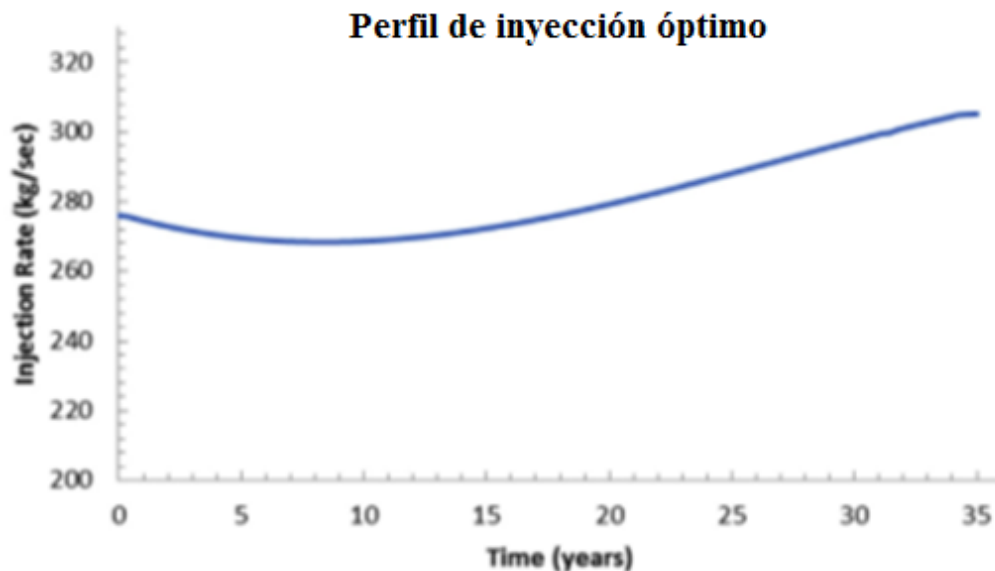


Figura 47: Perfil óptimo de inyección. [21]

4.4. Hipótesis de partida

Una vez elegidos la tecnología y el tipo de ciclo termodinámico con los que va a operar la central, hay que establecer una serie de condiciones a partir de las cuales realizar los cálculos correspondientes al ciclo termodinámico. Hay que analizar dos periodos distintos de operación de la planta. El primero de ellos, desde el comienzo de la explotación hasta el momento en el que la temperatura del yacimiento comienza a caer. El segundo de ellos, desde el final del anterior hasta el agotamiento térmico del yacimiento.

Inicialmente se han realizado las siguientes hipótesis:

- El cálculo del ciclo termodinámico se realiza en estado estacionario, y al 100% de carga de la central.
- Los componentes del ciclo no intercambian calor con el exterior.
- Se desprecian las energías cinética y potencial del fluido de trabajo.
- Las presiones y temperaturas en cualquier punto del ciclo deben ser superiores a la presión y temperatura crítica del CO₂, de forma que el fluido se mantenga en condiciones supercríticas, excepto a la entrada del compresor (o compresores) donde solo la presión deberá estar por encima de la presión crítica.
- La distribución de los pozos de producción e inyección se considerarán distribuidos tal y como aparecen en la FIGURA 41.

Además, se han asumido las siguientes condiciones de diseño:

Yacimiento	
Profundidad [km]	5
Espesor [m]	305
Área [km ²]	4
Distancia entre fracturas [m]	50
Fracción de volumen permeable [%]	2
Permeabilidad [m ²]	$50 \cdot 10^{-15}$
Porosidad en el dominio permeable [%]	50
Densidad de la roca [kg/m ³]	2650
Calor específico de la roca [J/(kgK)]	1000
Conductividad térmica de la roca [W/(mK)]	2,5
Distancia inyector-productor [m]	707,1

Tabla 6: Características del yacimiento geotérmico. Elaboración propia.

Ciclo termodinámico	
Presión media del yacimiento [bar]	200
Flujo de calor por unidad de superficie procedente del manto $\left[\frac{mW}{m^2}\right]$	32
Flujo de calor por unidad de superficie en el exterior $\left[\frac{mW}{m^2}\right]$	108,2
Espesor de la litosfera afectada por radiación [km]	13
Conductividad térmica media de la litosfera $\left[\frac{W}{mk}\right]$	2,5
Presión atmosférica [bar]	1,01325
Temperatura ambiente media máxima[°C]	15
Temperatura ambiente media mínima[°C]	10
Humedad relativa ambiente media máxima [%]	75
Humedad relativa ambiente media mínima [%]	70
γ en la turbina	1,306
γ en el compresor	1,048
Temperatura crítica del CO ₂ [°C]	30,98
Presión crítica del CO ₂ [bar]	73,77
Presión en el refrigerador (lado gas) [bar]	75
Diferencia de temperatura entre la temperatura del yacimiento y la temperatura de producción del fluido [°C]	10
Rango [°C]	15
Aproximación [°C]	3
Pinch [°C]	3
Rendimiento politrópico del compresor [%]	90
Rendimiento politrópico de la turbina [%]	90
Rendimiento de la bomba del agua de refrigeración [%]	90
Rendimiento electromecánico del generador [%]	98
Rendimiento mecánico del compresor [%]	99,8
Rendimiento mecánico de la turbina [%]	99,8

Tabla 7: Condiciones de diseño del ciclo termodinámico. Elaboración propia.

Refrigerador	
Velocidad media del agua por los tubos [m/s]	3
Número de pasos por los tubos	2
Diámetro exterior de los tubos [mm]	24
Nº de galga	25
Factor de ensuciamiento de los tubos $\left[\frac{m^2K}{W}\right]$	0,00024
Material de los tubos	Cuproníquel 70-30

Tabla 8: Condiciones de diseño del refrigerador. Elaboración propia.

Torre de refrigeración	
Incremento de la temperatura de bulbo húmedo [°C]	15
Parámetros adimensionales del empaquetamiento:	
a _d	0,56
b _d	0,58
a _p	1,74
b _p	12,4

Tabla 9: Condiciones de diseño de la torre de refrigeración. Elaboración propia.

Por último, queda por definir el flujo másico de CO₂. Es necesario definir un valor de flujo másico distinto para cada ciclo. Este valor dependerá de tres aspectos fundamentalmente.

En primer lugar, el tiempo de vida útil de la planta. Cuanto mayor sea el flujo másico de CO₂, menor será este tiempo de vida, ya que será mayor la potencia extraída del yacimiento, con lo que se acelerará su agotamiento térmico.

En segundo lugar, y como se ha explicado en el APARTADO 4.3 de este trabajo, la temperatura de producción afecta a la movilidad del fluido, y esta al flujo del mismo. Según disminuye la temperatura del yacimiento, aumenta dicha movilidad, y con ella la cantidad de fluido que se puede mover por el ciclo. Por ello es por lo que se van a analizar dos periodos de funcionamiento para cada ciclo como se había avanzado al principio de este apartado.

Por último, la temperatura de inyección tiene una influencia directa en el descenso de temperatura del yacimiento. Cuanto menor es la temperatura del fluido inyectado, mayor potencia es requerida para calentar este fluido hasta la temperatura de producción, lo que influye negativamente en la temperatura del yacimiento y acorta la vida útil de la planta. Esta temperatura depende de cada ciclo, con lo que dependiendo del ciclo termodinámico que se vaya a emplear, se tendrá un valor u otro de flujo másico.

La temperatura inicial en el yacimiento, calculada a partir de la ecuación (1), se estima en 204,4°C. Esta temperatura es muy similar a la empleada en el estudio analizado en el APARTADO 4.3, al igual que el resto de condiciones del yacimiento geotérmico. Si además, se considera la vida útil de la central en 35 años, con un primer periodo de funcionamiento de 15 años, donde la temperatura apenas desciende, y un segundo periodo, de 20 años, donde la temperatura desciende a un ritmo aproximadamente constante de 5°C/año, pueden usarse los resultados de este estudio para determinar el flujo másico de CO₂ óptimo para cada ciclo y para cada periodo de funcionamiento.

Como se comprobará en el APARTADO 4.6.1., los valores de flujo de CO₂ del perfil de inyección de la FIGURA 47, se corresponden con los que se obtendrían en un ciclo Brayton simple en el que se mantiene un perfil de potencia térmica extraída como el de la FIGURA 43, y con un perfil de temperaturas de producción como el de la FIGURA 44.

En el diseño que se va a realizar del ciclo Brayton simple, los valores de flujo másico de CO₂ que se van a utilizar se han obtenido del perfil de inyección de la Figura 47, tomando en ambos periodos de funcionamiento los valores medios de flujo másico. Estos valores se deben multiplicar por la relación de áreas de yacimiento (4 en este caso).

Flujo másico de CO ₂ en el ciclo Brayton simple	
Primer periodo	1088 kg/s
Segundo periodo	1160 kg/s

Tabla 10: Valores de flujo másico de CO₂ en el ciclo Brayton simple para ambos periodos de funcionamiento. Elaboración propia

Para el resto de posibles configuraciones para un ciclo Brayton no se dispone de un perfil de inyección como en el caso anterior. Sin embargo, si se desea mantener, tanto el perfil de temperaturas de producción como el tiempo de vida útil de la central, debe mantenerse también el perfil de potencia extraída del yacimiento. Con lo que se pueden obtener los valores de flujo de CO₂ para estos ciclos a partir de los obtenidos para el ciclo Brayton simple. En particular, los valores correspondientes al ciclo Brayton con regeneración son los siguientes:

Flujo másico de CO ₂ en el ciclo Brayton con regeneración	
Primer periodo	1607 kg/s
Segundo periodo	1426 kg/s

Tabla 11: Valores de flujo másico de CO₂ en el ciclo Brayton con regeneración para ambos periodos de funcionamiento. Elaboración propia

En este caso, al contrario que en el ciclo Brayton simple, en el que el flujo másico aumentaba en el segundo periodo gracias al aumento de movilidad del fluido durante el enfriamiento del yacimiento, el flujo másico disminuye a pesar del aumento en la movilidad del CO₂. Esto se debe a que, al implementar el sistema de regeneración, la temperatura de inyección disminuye según lo va haciendo la de producción, con lo que la cantidad de fluido que circula por el ciclo debe ser menor para evitar un agotamiento térmico prematuro del yacimiento.

4.5. Software empleado para los cálculos del ciclo Brayton

Para realizar los cálculos necesarios para diseñar el ciclo de producción de potencia se ha empleado el software de cálculo algebraico Mathcad 14, distribuido por la compañía PTC (Parametric Technology Corporation). Se ha escogido este programa porque permite realizar todo tipo de cálculos numéricos de una forma sencilla, con un sistema de introducción de datos muy similar al de una calculadora científica, y una interfaz gráfica de uso muy intuitivo que permite verificar rápidamente los datos y expresiones introducidas. Se puede, también, implementar subprogramas, y hacer uso de librerías de datos, como Coolprop (versión 6.1.0.), de la que se ha hecho uso para obtener las propiedades de los distintos fluidos.

Además, se ha hecho uso del software Thermoflex 23, del conjunto de programas distribuidos por Thermoflow. Este software permite diseñar cualquier tipo de ciclo de

producción de potencia, mediante el ensamblado en su interfaz gráfica de los elementos que componen dichos ciclos e introduciendo una serie de datos de partida. Al mismo tiempo, el programa avisa de los errores que se estén cometiendo en el diseño para que puedan subsanarse, o incluso corregirlos el mismo en el caso de pequeños errores. Se ha empleado este software a modo de comprobación de los cálculos realizados en Mathcad.

4.6. Resultados del ciclo termodinámico

Para comprobar el efecto de las mejoras propuestas en el APARTADO 4.2.3, se ha procedido al diseño tanto del ciclo Brayton Simple como del ciclo Brayton con regeneración, para poder comparar como dicha regeneración afecta al rendimiento del ciclo y la viabilidad de la misma. Las mejoras de interenfriamiento y recalentamiento no se han considerado en el diseño por diferentes motivos.

En el caso del interenfriamiento, el coste del sistema de refrigeración adicional que requiere solo estaría justificado en casos en los que, debido a un bajo rendimiento del compresor o a una relación de compresión muy elevada, la temperatura del fluido de trabajo aumentase considerablemente tras la compresión, con lo que, al enfriar este fluido, la diferencia entre el calor recuperado en la regeneración, con y sin interenfriamiento, fuese grande. Se va a ver cómo, debido a las condiciones en las que va a realizarse la compresión, el incremento de temperatura del CO₂ en dicha compresión no es suficiente como para que instalar un sistema de interenfriamiento resulte económicamente viable.

En el caso del recalentamiento, realizarlo resultaría muy beneficioso, tanto para el rendimiento del ciclo como para el trabajo mecánico generado en la turbina, gracias a que las propiedades termodinámicas del CO₂ supercrítico mejoran mucho con el aumento de su temperatura. Sin embargo, al no poder realizarse el recalentamiento en el propio yacimiento y tener que hacer uso de una fuente de energía adicional, el sistema se ha descartado, ya que en este proyecto se persigue el diseño de una central cuya única fuente de energía sea la energía geotérmica.

A pesar de que no se vaya a realizar un análisis en profundidad de estos dos sistemas, ni de la combinación de ambos, puesto que el programa Thermoflex permite diseñar de forma rápida estos ciclos, si se van a analizar los efectos de su implementación en el ciclo.

Además, se van a comparar los resultados para ambos periodos de funcionamiento. Los resultados del primer periodo se ajustan casi por completo a los resultados que se obtendrían en la realidad, ya que la consideración de que la temperatura del yacimiento no varía en los primeros 15 años de explotación es cierta, como puede verse en la FIGURA 44. En cuanto a los resultados para el segundo periodo, los últimos 20 años de funcionamiento en los que la temperatura del yacimiento baja, estos resultados muestran valores medios que se obtendrían alrededor de la mitad de este periodo, obteniéndose mejores resultados en los primeros años, y peores en los últimos.

4.6.1. Resultados del ciclo Brayton simple

En el ANEXO I pueden consultarse en detalle los cálculos realizados del ciclo Brayton simple, así como los realizados para el diseño del refrigerador y la torre de refrigeración correspondientes a este ciclo, para ambos periodos. A continuación, se muestra un breve resumen de estos resultados.

Durante los 15 primeros años de funcionamiento se obtienen los siguientes resultados:

- Potencia neta de la central: 46,59 MW
- Rendimiento de la central: 12,2 %
- Potencia térmica absorbida por el fluido: 382,8 MW
- Potencia térmica cedida al ambiente en el refrigerador: 334,6 MW
- Potencia mecánica generada en la turbina: 65,16 MW
- Potencia mecánica consumida en el compresor: 17,1 MW
- Potencia mecánica consumida por la bomba del agua de refrigeración: 516,9 kW

Los resultados para los siguientes 20 años son los siguientes:

- Potencia neta de la central: 32,86 MW
- Rendimiento de la central: 10,3 %
- Potencia térmica absorbida por el fluido: 318,8 MW
- Potencia térmica cedida al ambiente en el refrigerador: 284,4 MW
- Potencia mecánica generada en la turbina: 52,5 MW
- Potencia mecánica consumida en el compresor: 18,23 MW
- Potencia mecánica consumida por la bomba del agua de refrigeración: 719,7 kW

Los valores de presión, temperatura, flujo másico de fluido y entalpía específica de los distintos puntos del ciclo se muestran en la TABLA 12 y TABLA 13.

En ambos casos, tanto la temperatura como la presión del fluido, excepto a la entrada del compresor (salida del refrigerador), son superiores a los valores de presión y temperatura crítica del CO₂, como se pedía en el APARTADO 4.4.

Si se comparan estos resultados con los obtenidos mediante el programa informático Thermoflex (FIGURA 48 y FIGURA 49), se puede apreciar que las diferencias son mínimas. Estas pequeñas diferencias, pueden deberse al uso de distintas correlaciones para el cálculo de las propiedades del fluido.

Comparando ambos periodos de funcionamiento, se observa un descenso tanto en la potencia como en el rendimiento, debido al descenso en la temperatura del fluido de trabajo y al aumento de la cantidad del fluido que se maneja en el ciclo, lo que reduce la potencia generada en la turbina y aumenta la potencia consumida por el compresor.

Punto	Presión [bar]	Temperatura [°C]	Flujo másico [kg/s]	Entalpía específica [kJ/kg]	Fluido	Descripción
1	75	15,91	1088	236,3	CO2	Entrada al compresor/Salida del refrigerador
2	200	28,58	1088	252	CO2	Salida del compresor/Pozo de inyección
3	200	204,4	1088	603,8	CO2	Pozo de producción/Entrada a la turbina
4	75	115,96	1088	543,8	CO2	Salida de la turbina/Entrada al refrigerador
5	1,01325	27,91	5331	117,1	Agua	Entrada de la torre de refrigeración/Salida del refrigerador
6	1,01325	12,91	5331	54,3	Agua	Salida de la torre de refrigeración/Entrada al refrigerador

Tabla 12: Propiedades de los fluidos de trabajo y refrigeración en los distintos puntos del ciclo Brayton simple durante el primer periodo de funcionamiento. Elaboración propia.

Punto	Presión [bar]	Temperatura [°C]	Flujo másico [kg/s]	Entalpía específica [kJ/kg]	Fluido	Descripción
1	75	15,91	1160	236,3	CO2	Entrada al compresor/Salida del refrigerador
2	200	28,58	1160	252	CO2	Salida del compresor/Pozo de inyección
3	200	152,2	1160	526,8	CO2	Pozo de producción/Entrada a la turbina
4	75	69,91	1160	481,4	CO2	Salida de la turbina/Entrada al refrigerador
5	1,01325	27,91	4531	117,1	Agua	Entrada de la torre de refrigeración/Salida del refrigerador
6	1,01325	12,91	4531	54,3	Agua	Salida de la torre de refrigeración/Entrada al refrigerador

Tabla 13: Propiedades de los fluidos de trabajo y refrigeración en los distintos puntos del ciclo Brayton simple durante el segundo periodo de funcionamiento. Elaboración propia.

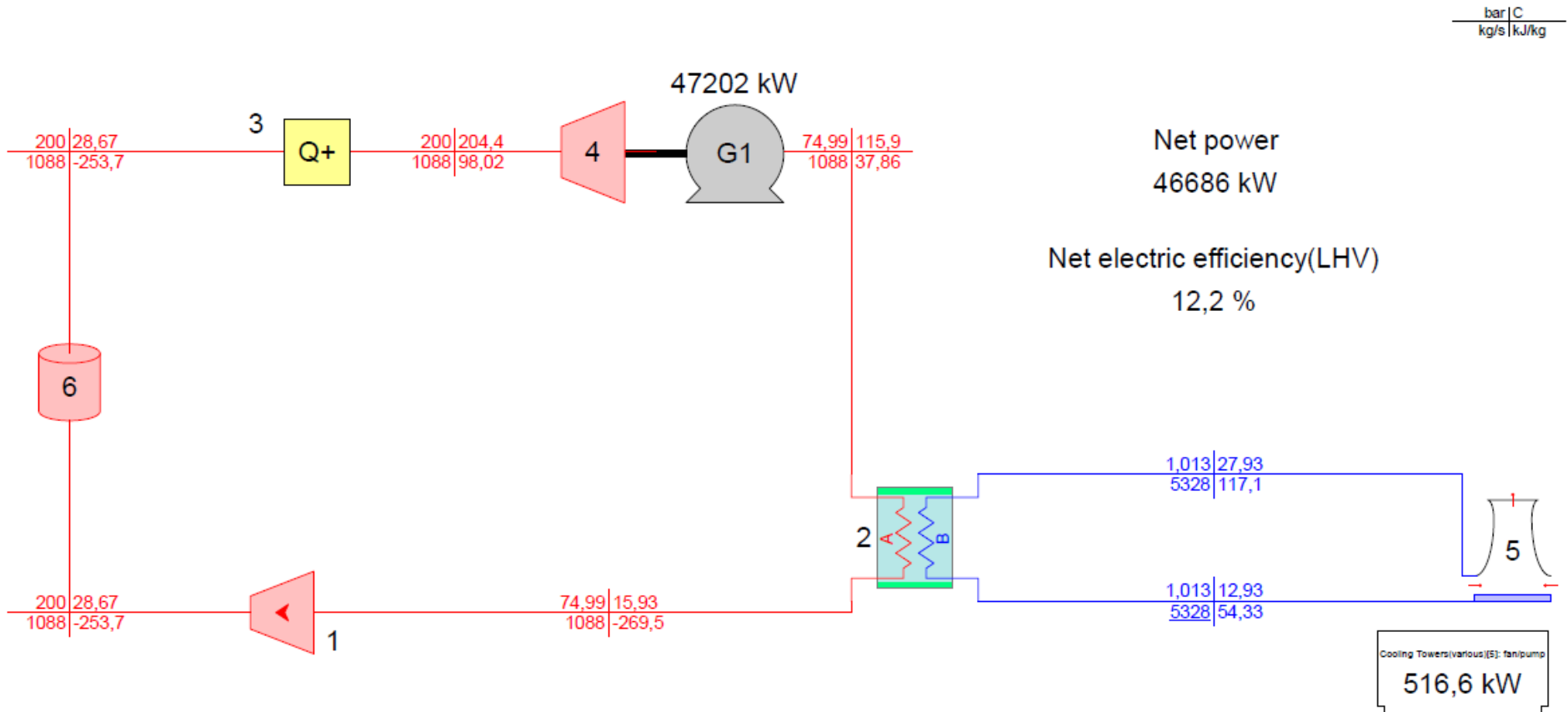


Figura 48: Esquema de la central trabajando con un ciclo Brayton simple durante el primer periodo de funcionamiento, hecho usando el programa Thermoflex. Elaboración propia.

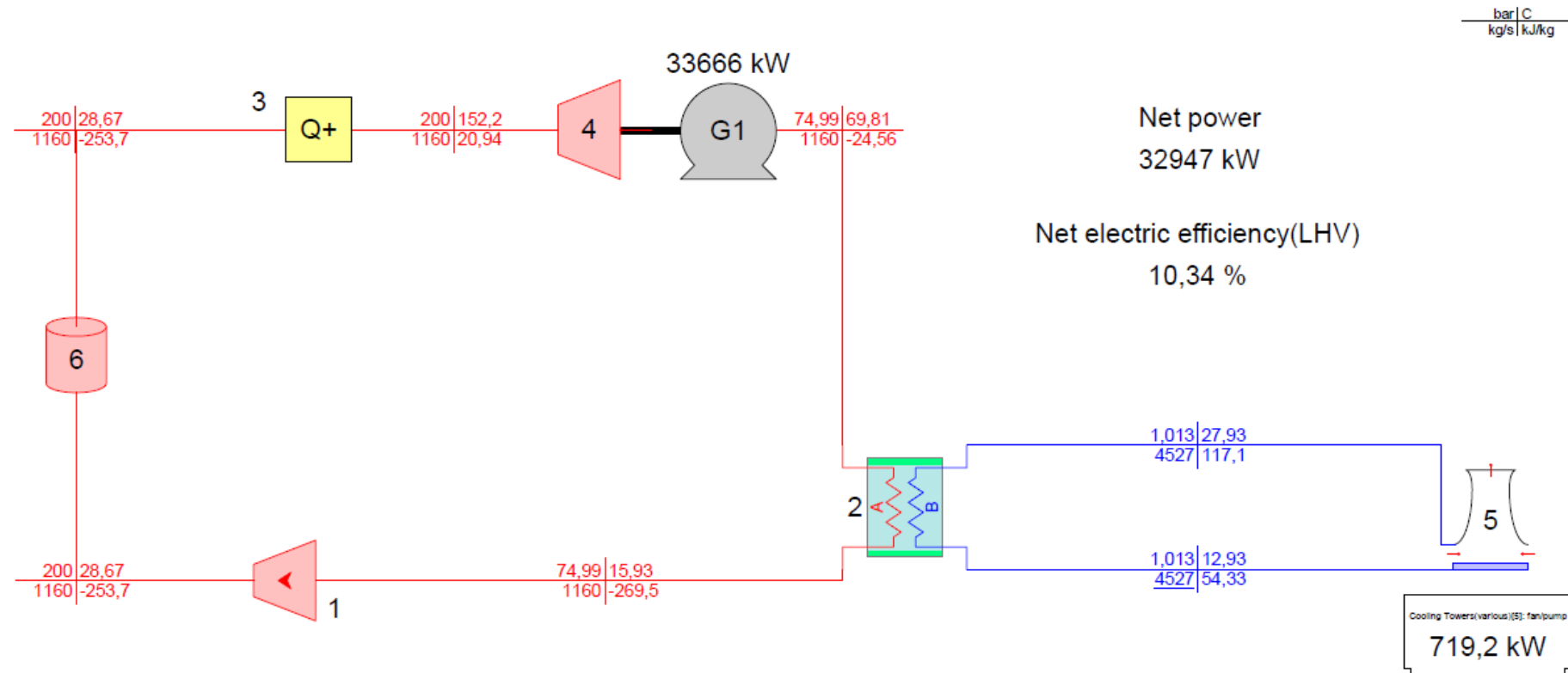


Figura 49: Esquema de la central trabajando con un ciclo Brayton simple durante el segundo periodo de funcionamiento, hecho usando el programa Thermoflex. Elaboración propia.

4.6.2. Resultados del ciclo Brayton con regeneración

Al igual que en el caso anterior, en el ANEXO II pueden consultarse en detalle los cálculos realizados del ciclo Brayton con regeneración, así como los realizados para el diseño del refrigerador y la torre de refrigeración correspondientes a los ciclos de ambos periodos. A continuación, se muestra un breve resumen de estos resultados.

Durante el primer periodo se obtiene:

- Potencia neta de la central: 68,09 MW
- Rendimiento de la central: 17,8%
- Potencia térmica absorbida por el fluido: 382,8 MW
- Potencia térmica intercambiada en el regenerador: 182,6 MW
- Potencia térmica cedida al ambiente en el refrigerador: 311,6 MW
- Potencia mecánica generada en la turbina: 96,24 MW
- Potencia mecánica consumida en el compresor: 25,25 MW
- Potencia mecánica consumida por la bomba del agua de refrigeración: 1479 kW

Durante el segundo periodo se obtiene:

- Potencia neta de la central: 39,97 MW
- Rendimiento de la central: 12,5%
- Potencia térmica absorbida por el fluido: 318,8 MW
- Potencia térmica intercambiada en el regenerador: 73,07 MW
- Potencia térmica cedida al ambiente en el refrigerador: 276,5 MW
- Potencia mecánica generada en la turbina: 64,54 MW
- Potencia mecánica consumida en el compresor: 22,41 MW
- Potencia mecánica consumida por la bomba del agua de refrigeración: 1312 kW

Los valores de presión, temperatura, flujo másico de fluido y entalpía específica de los distintos puntos del ciclo se muestran en la TABLA 14 y TABLA 15.

De nuevo, se puede comprobar como los valores de temperatura y presión de cada uno de estos puntos, excepto a la entrada del compresor (salida del refrigerador), son superiores a los valores de presión y temperatura crítica del CO₂, en ambos casos, como se pedía en el APARTADO 4.4.

Las diferencias con los resultados obtenidos mediante el programa informático Thermoflex (FIGURA 50 y FIGURA 51), son también muy pequeñas, y se deben, como en el caso anterior, al uso de distintas correlaciones para el cálculo de las propiedades del fluido.

En este caso, el descenso tanto de temperatura como de rendimiento entre ambos periodos es muy apreciable, debido precisamente al acoplamiento que, como ya se ha comentado, se produce entre las temperaturas de producción e inyección al implementar el sistema de regeneración en el ciclo.

Punto	Presión [bar]	Temperatura [°C]	Flujo másico [kg/s]	Entalpía específica [kJ/kg]	Fluido	Descripción
1	75	15,91	1607	236,3	CO ₂	Entrada al compresor/Salida del refrigerador
2	200	28,58	1607	252	CO ₂	Salida del compresor/Entrada al regenerador
2b	200	74,93	1607	365,6	CO ₂	Salida del regenerador/Pozo de inyección
3	200	204,4	1607	603,8	CO ₂	Pozo de producción/Entrada a la turbina
4	75	115,96	1607	543,8	CO ₂	Salida de la turbina/Entrada al regenerador
4b	75	43,58	1607	430,2	CO ₂	Salida del regenerador/Entrada al refrigerador
5	1,01325	27,91	4964	117,1	Agua	Entrada de la torre de refrigeración/Salida del refrigerador
6	1,01325	12,91	4964	54,3	Agua	Salida de la torre de refrigeración/Entrada al refrigerador

Tabla 14: Propiedades de los fluidos de trabajo y refrigeración en los distintos puntos del ciclo Brayton con regeneración durante el primer periodo de funcionamiento. Elaboración propia.

Punto	Presión [bar]	Temperatura [°C]	Flujo másico [kg/s]	Entalpía específica [kJ/kg]	Fluido	Descripción
1	75	15,91	1426	236,3	CO ₂	Entrada al compresor/Salida del refrigerador
2	200	28,58	1426	252	CO ₂	Salida del compresor/Entrada al regenerador
2b	200	51,29	1426	303,2	CO ₂	Salida del regenerador/Pozo de inyección
3	200	152,2	1426	526,8	CO ₂	Pozo de producción/Entrada a la turbina
4	75	69,91	1426	481,4	CO ₂	Salida de la turbina/Entrada al regenerador
4b	75	43,58	1426	430,2	CO ₂	Salida del regenerador/Entrada al refrigerador
5	1,01325	27,91	4405	117,1	Agua	Entrada de la torre de refrigeración/Salida del refrigerador
6	1,01325	12,91	4405	54,3	Agua	Salida de la torre de refrigeración/Entrada al refrigerador

Tabla 15: Propiedades de los fluidos de trabajo y refrigeración en los distintos puntos del ciclo Brayton con regeneración durante el segundo periodo de funcionamiento. Elaboración propia

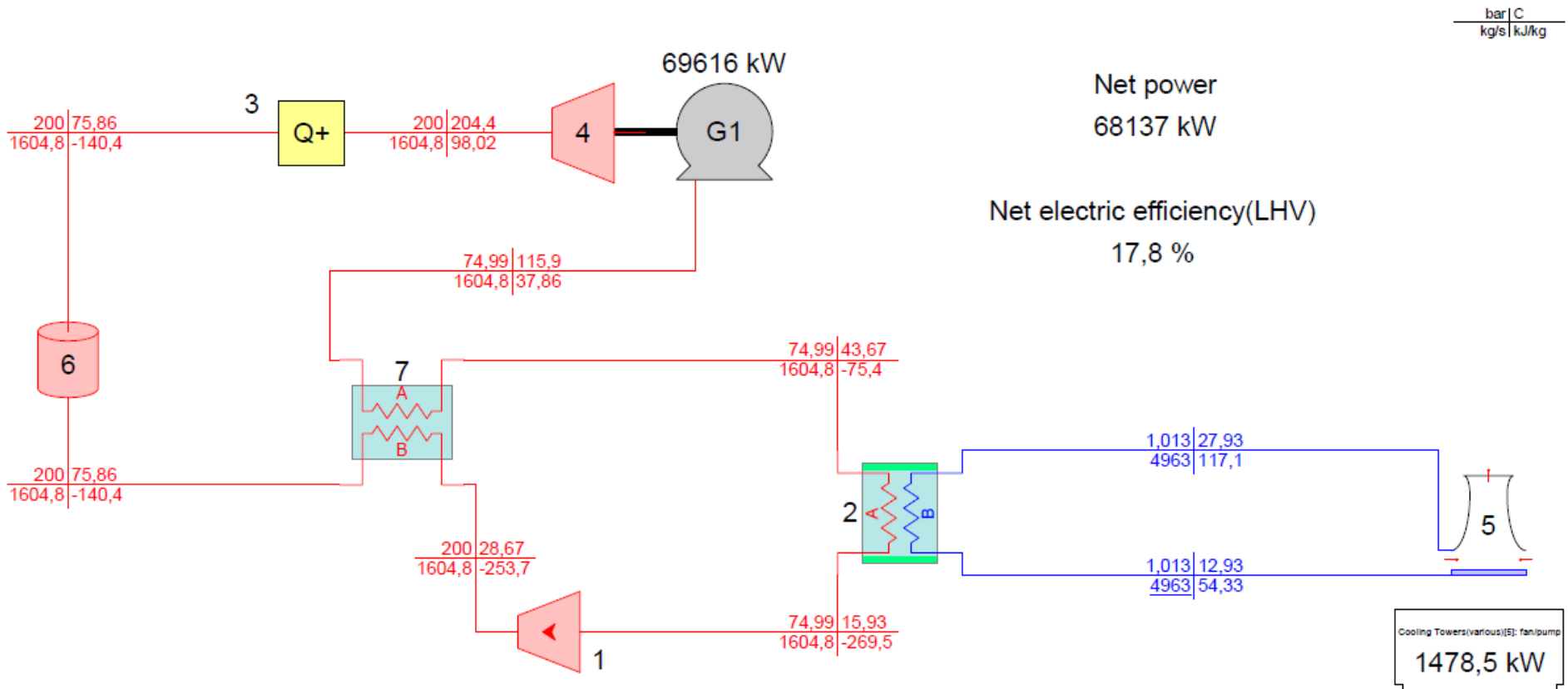


Figura 50: Esquema de la central trabajando con un ciclo Brayton con regeneración durante el primer periodo de funcionamiento, hecho usando el programa Thermoflex. Elaboración propia.

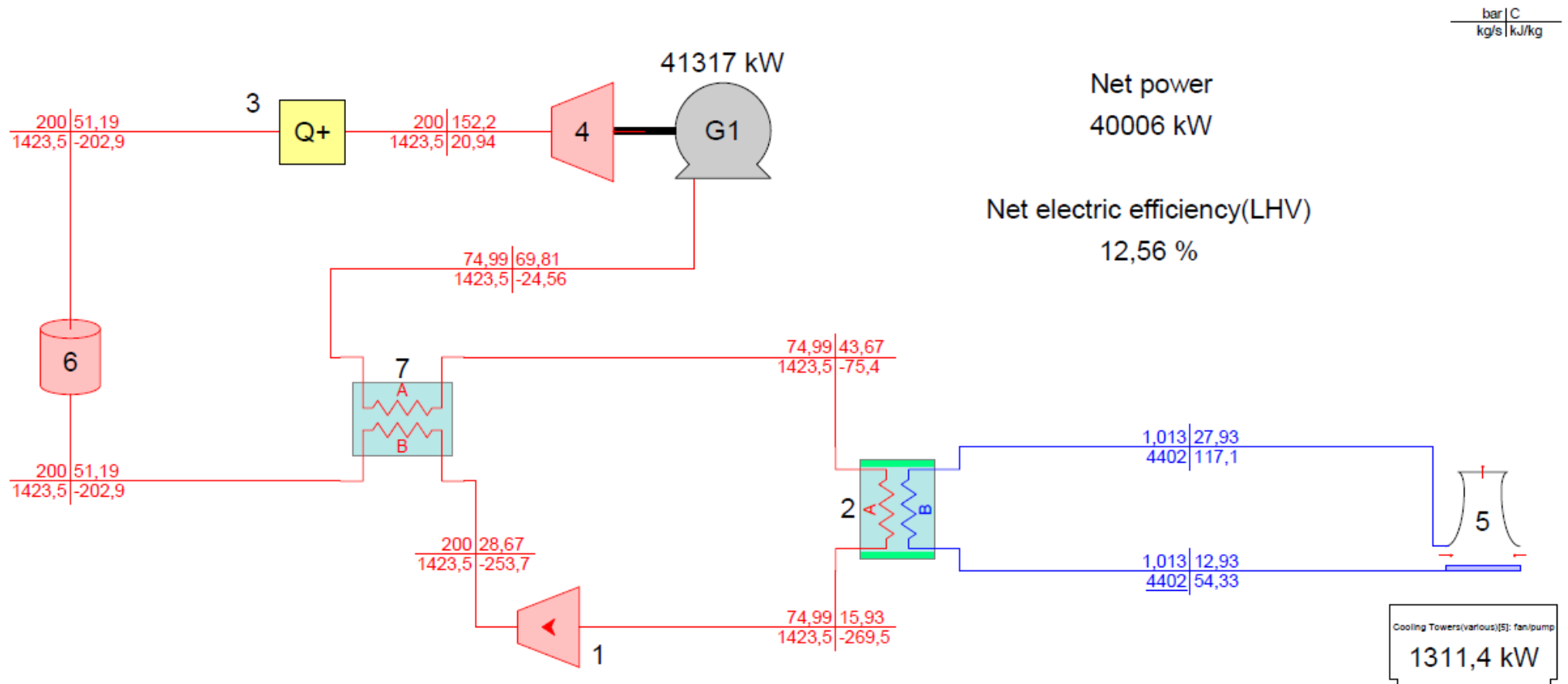


Figura 51: Esquema de la central trabajando con un ciclo Brayton con regeneración durante el segundo periodo de funcionamiento, hecho usando el programa Thermoflex. Elaboración propia.

4.6.3. Comparación de resultados

Comparando los dos ciclos anteriores puede verse como en ambos periodos, tanto la potencia generada como el rendimiento aumentan en el ciclo Brayton con regeneración con respecto al ciclo Brayton simple. Esta diferencia es mayor en el primer periodo, donde gracias a la regeneración se obtienen 21,5 MW adicionales y el rendimiento aumenta un 5,6%. En el segundo periodo, al no existir tanta diferencia en el flujo másico de CO₂ con respecto al ciclo Brayton simple, esta diferencia se reduce, siendo el incremento de potencia de tan solo 7,11 MW, y el aumento del rendimiento del 2,2%.

De estos resultados se puede concluir que implementar un sistema de regeneración al ciclo Brayton produce, sobre todo durante el primer periodo, un gran aumento tanto de la potencia como del rendimiento de la planta, que se deben principalmente a que permite trabajar con una mayor cantidad de fluido en el ciclo sin que con ello aumente la potencia extraída del yacimiento, y, por lo tanto, sin acelerar el agotamiento térmico del mismo. Por otro lado, aunque en este trabajo se ha optado por aumentar el gasto másico de fluido en el ciclo con regeneración, esta no es la única opción. En lugar de esto, podría optarse por mantener el gasto másico de la configuración para el ciclo Brayton simple, de forma que, al extraerse mucha menos potencia del yacimiento, se podría mantener el funcionamiento de la central durante un ciclo de vida más largo, donde la potencia generada sea más homogénea durante ambos periodos.

Añadir al ciclo con regeneración un sistema de interenfriamiento, manteniendo tanto los 35 años de vida útil de la planta como la potencia extraída, no produce un aumento significativo ni de la potencia generada, ni del rendimiento, como puede verse en la FIGURA 52 y en la FIGURA 53. Ya se había adelantado que introducir este sistema a este ciclo en particular no resultaría en un gran beneficio debido a que las condiciones en las que se realiza la compresión hacen que el CO₂ se caliente mínimamente, con lo que el calor intercambiado en el regenerador apenas varía. De hecho, es tan bajo que el aumento del consumo de la bomba de refrigeración podría llegar a ser superior al incremento de potencia intercambiada en el regenerador.

Por el contrario, como ya se había avanzado, si se dividiese la expansión en dos partes, con un recalentamiento intermedio que suba la temperatura de entrada a la segunda turbina hasta la temperatura de entrada a la primera, se produciría, con respecto al ciclo con regeneración, un aumento de potencia de 27,41 MW y un aumento en el rendimiento del 1,27% durante el primer periodo, y un aumento de potencia de 22,7 MW y un aumento del rendimiento del 1,89% durante el segundo periodo, como se puede ver en la FIGURA 54 y en la FIGURA 55 respectivamente.

Por último, si se hace uso de las tres mejoras de forma simultánea (FIGURA 56 y FIGURA 57) se consigue el mayor rendimiento de todos, con diferencias que alcanzan los 32,41 MW de potencia y un 2,08% en el rendimiento del primer periodo, y 26 MW de potencia y un 2,48% en el rendimiento del segundo periodo con respecto al ciclo con regeneración. En este caso, además, se puede comprobar como la interacción entre el recalentamiento y el interenfriamiento es mucho más rentable y se obtienen mayores valores de potencia y rendimiento que con el uso de ambas técnicas por separado. Esto se debe a que ambos sistemas aumentan la diferencia de temperaturas entre el foco frío y el foco caliente, con lo que, en el regenerador, se recupera mucha más energía, en lugar de cederla al ambiente.

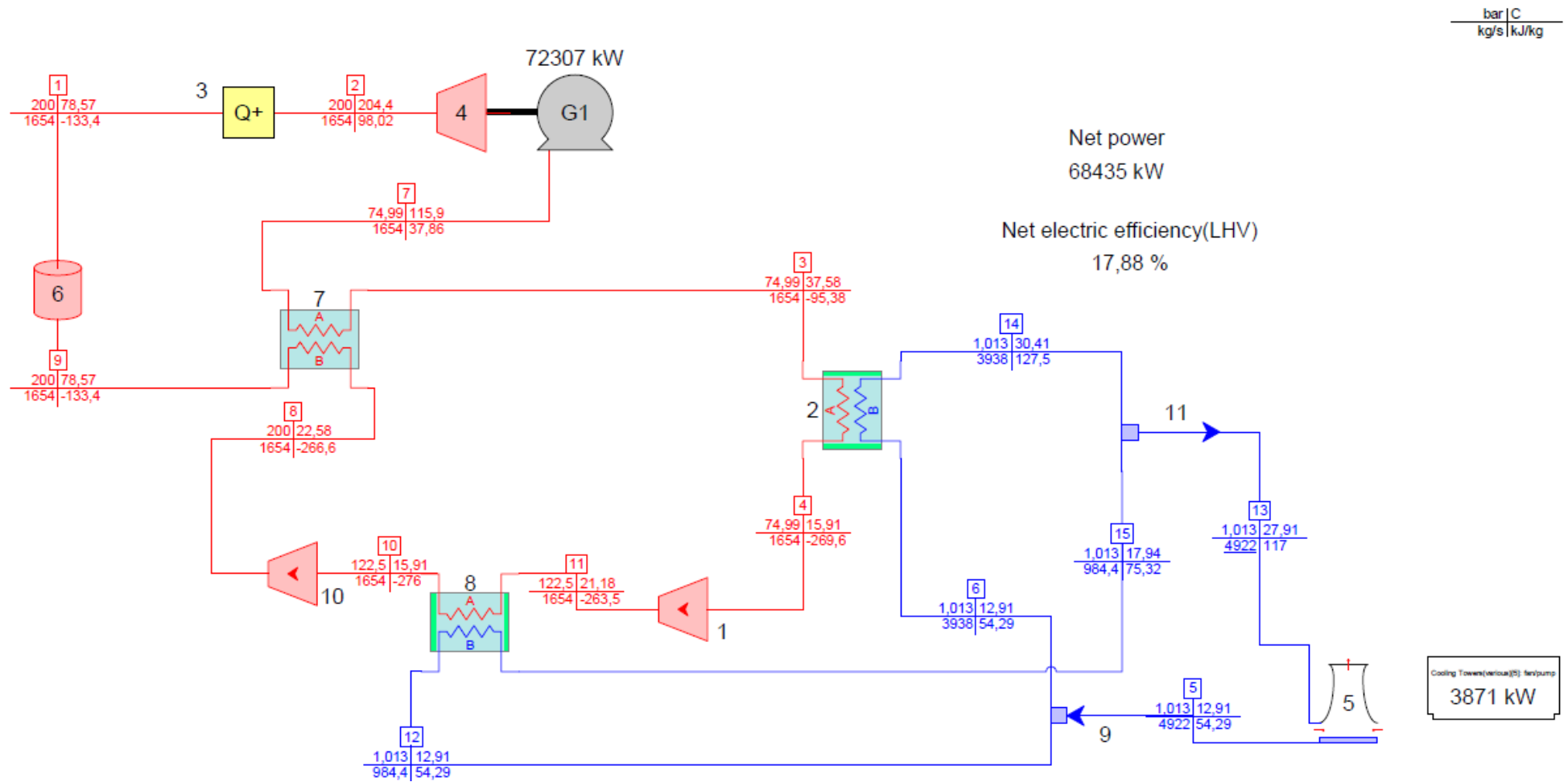


Figura 52: Esquema de la central trabajando con un ciclo Brayton con regeneración e interenfriamiento durante el primer periodo de funcionamiento, hecho usando el programa Thermoflex. Elaboración propia.

bar | C
kg/s | kJ/kg

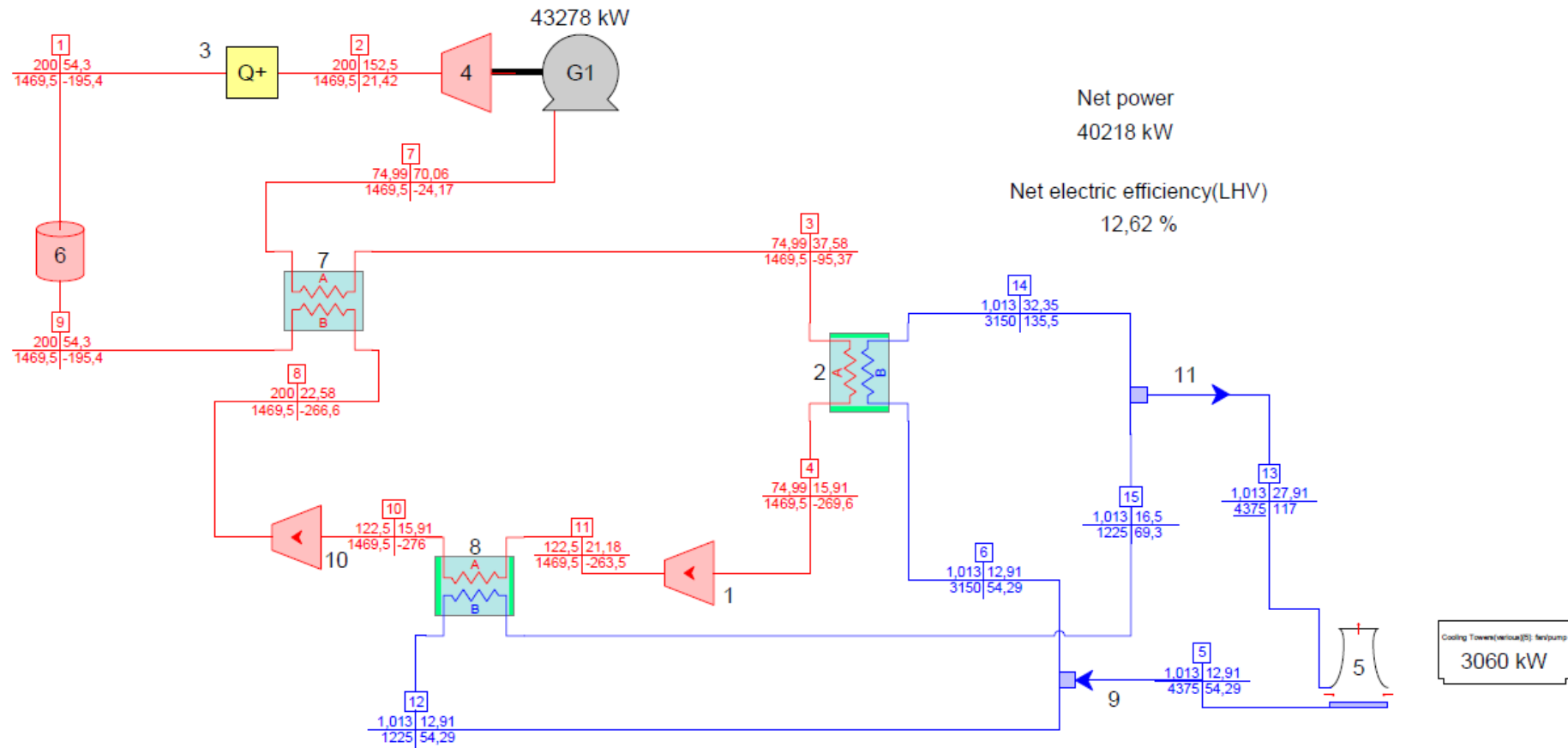


Figura 53: Esquema de la central trabajando con un ciclo Brayton con regeneración e interenfriamiento durante el segundo periodo de funcionamiento, hecho usando el programa Thermoflex. Elaboración propia.

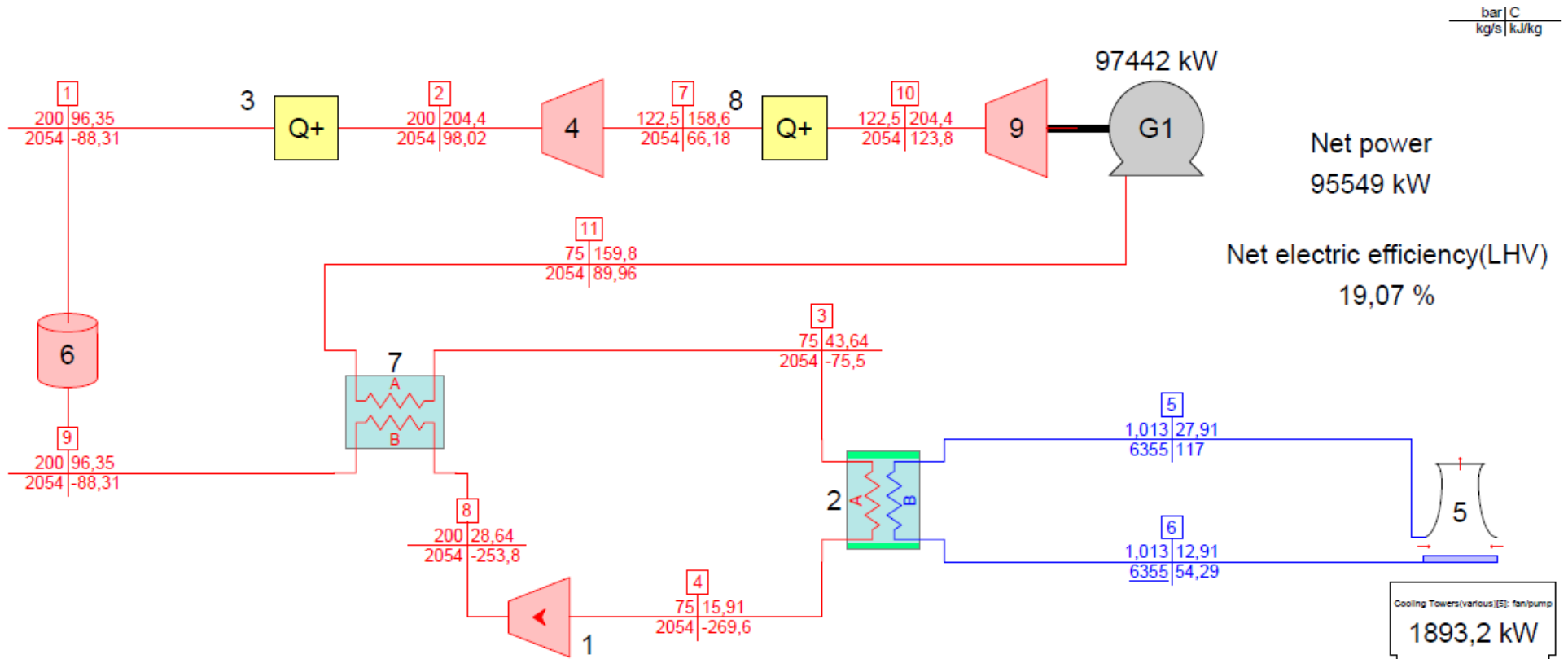


Figura 54: Esquema de la central trabajando con un ciclo Brayton con regeneración y recalentamiento durante el primer periodo de funcionamiento, hecho usando el programa Thermoflex. Elaboración propia.

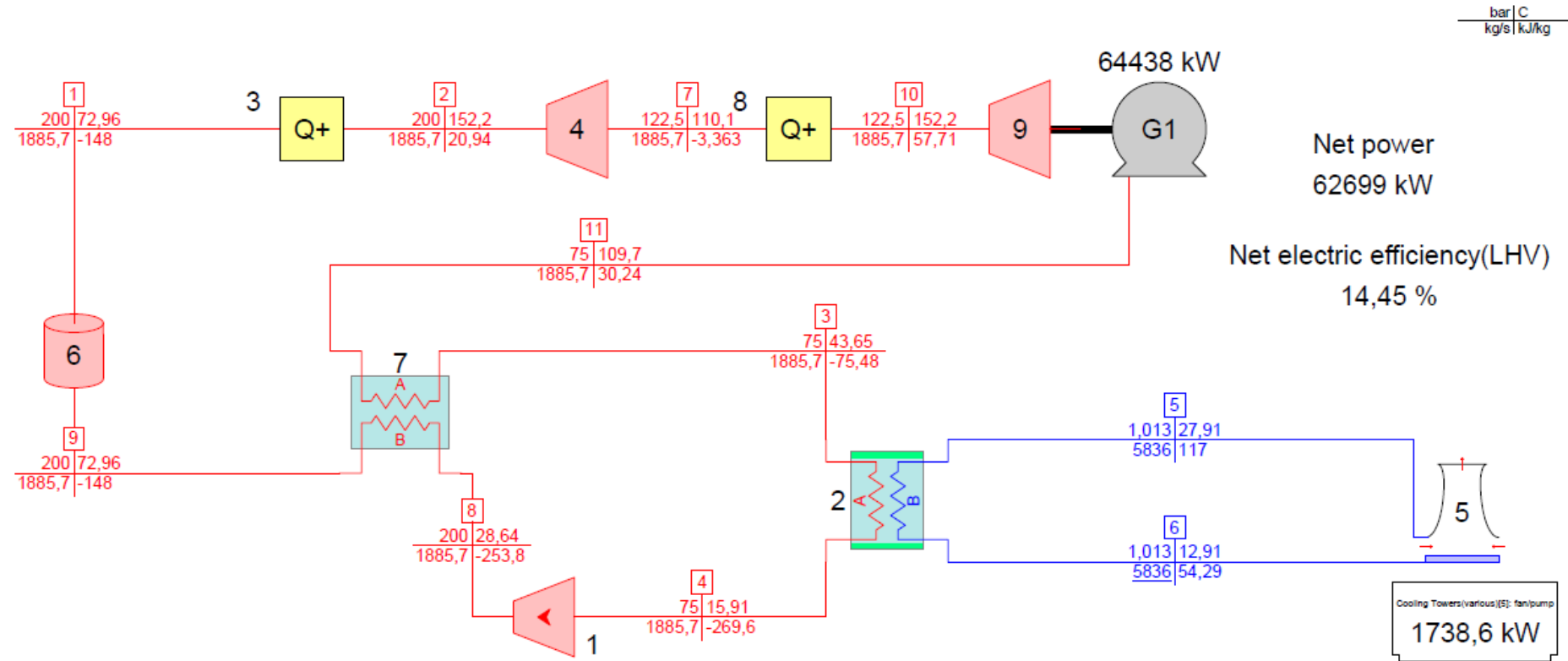


Figura 55: Esquema de la central trabajando con un ciclo Brayton con regeneración y recalentamiento durante el segundo periodo de funcionamiento, hecho usando el programa Thermoflex. Elaboración propia.

bar | C
kg/s | kJ/kg

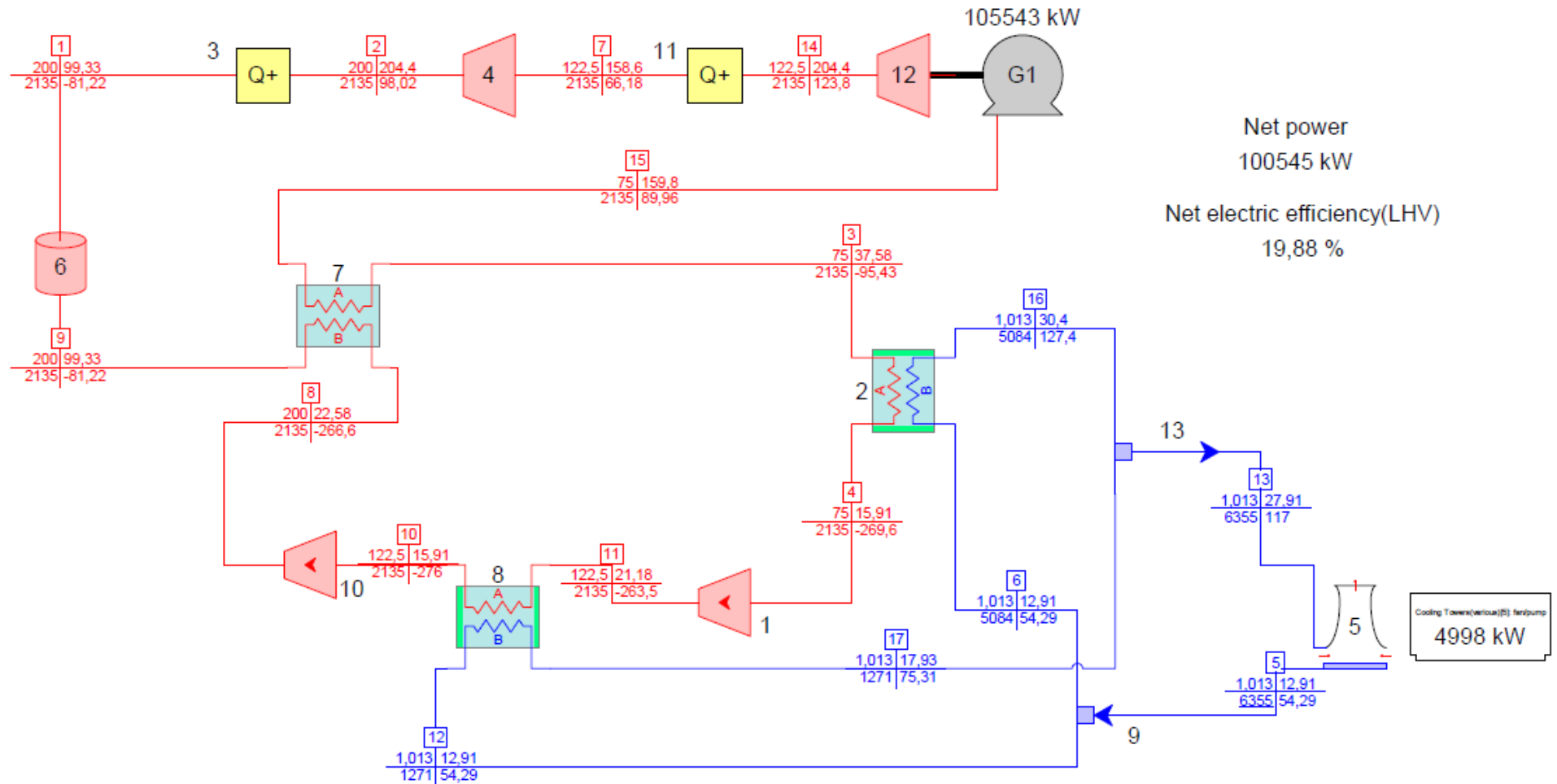


Figura 56: Esquema de la central trabajando con un ciclo Brayton con regeneración, interenfriamiento y recalentamiento durante el primer periodo de funcionamiento, hecho usando el programa Thermoflex. Elaboración propia.

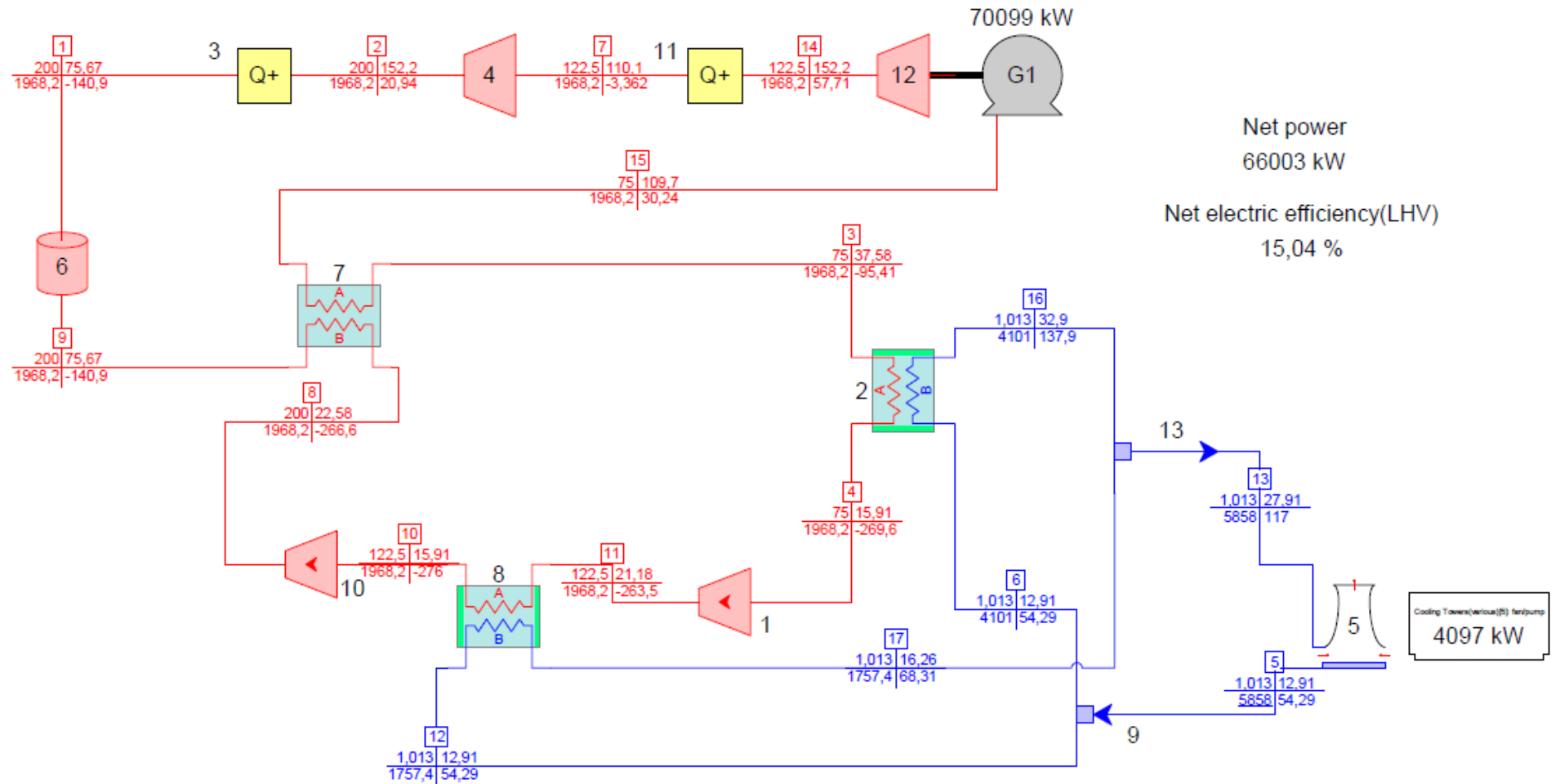


Figura 57: Esquema de la central trabajando con un ciclo Brayton con regeneración, interenfriamiento y recalentamiento durante el segundo periodo de funcionamiento, hecho usando el programa Thermoflex. Elaboración propia.

5. Impacto ambiental

En este apartado se van a analizar las emisiones de los principales contaminantes derivados de la energía geotérmica. Se trata de una de las fuentes de energía menos contaminantes, con una producción de contaminantes prácticamente nula. Las centrales geotérmicas, al utilizar la energía almacenada bajo la superficie terrestre para elevar la temperatura del fluido de trabajo y que este genere electricidad, no emiten a la atmósfera los gases derivados de la combustión de los combustibles, así como tampoco otros contaminantes, como la materia particulada derivada de dicha combustión, o residuos radioactivos en el caso de centrales nucleares. Sin embargo, en el interior de los yacimientos suele haber una serie de gases no condensables que, una vez que son perforados, inevitablemente salen al exterior a lo largo de la vida útil de la central.

5.1. Sulfuro de hidrógeno (H₂S)

El H₂S es el contaminante de mayor preocupación en las centrales geotérmicas ya afecta corrosivamente a los elementos del ciclo de potencia. Se detecta fácilmente porque en pequeñas cantidades desprende un olor similar al de los huevos podridos, pero en grandes cantidades este olor deja de percibirse y es letal. Para controlar las emisiones de este gas, se instalan sistemas de abatimiento de H₂S, que son capaces de eliminar el 99,9% del sulfuro de hidrógeno. Una vez capturado, puede quemarse o se puede transformar en azufre elemental, que puede luego ser usado, por ejemplo, como fertilizante.

5.2. Dióxido de azufre (SO₂)

Cuando el sulfuro de hidrógeno es liberado a la atmósfera, este se oxida, dando lugar a dióxido de azufre y ácido sulfhídrico. El SO₂ es el principal causante de la lluvia ácida, ya que en la atmósfera reacciona con el oxígeno y con el agua dando lugar a ácido sulfúrico. Por otro lado, es un gas tóxico que irrita las vías respiratorias y que en concentraciones superiores a 100 ppm se vuelve letal. En las centrales geotérmicas, las cantidades de SO₂ generadas son minúsculas si se comparan con las producidas en centrales eléctricas convencionales, como puede verse en la FIGURA 58:

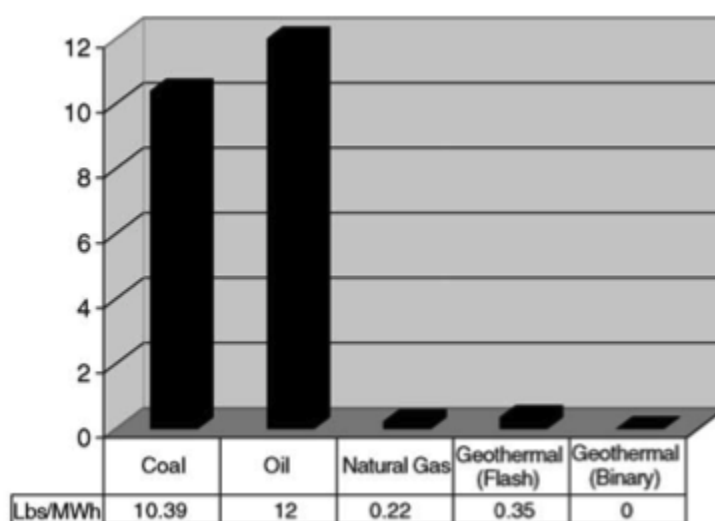


Figura 58: Comparación de emisiones de SO₂. [23]

5.3. Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Los óxidos de nitrógeno, como el NO o el NO₂, se tratan de gases generados durante los procesos de combustión, que una vez liberados a la atmósfera forman, a través de reacciones fotoquímicas, el denominado smog fotoquímico, la niebla de color marrón rojiza que puede verse habitualmente sobre las grandes ciudades (FIGURA 59). Este smog produce problemas respiratorios como bronquitis, asma o neumonía entre otros. Los NO_x, además, producen ácido nítrico en contacto con el agua atmosférica, otro de los compuestos de la lluvia ácida.



Figura 59: Comparación de Pekín en un día después de la lluvia (izquierda) y un día soleado con smog (derecha). [24]

Las emisiones de NO_x de las centrales geotérmicas, al no quemar combustibles, provienen de los sistemas de abatimiento de H₂S en los que se quema este gas. De nuevo, las emisiones NO_x no son comparables con las liberadas en la combustión de combustibles fósiles como muestra la FIGURA 60:

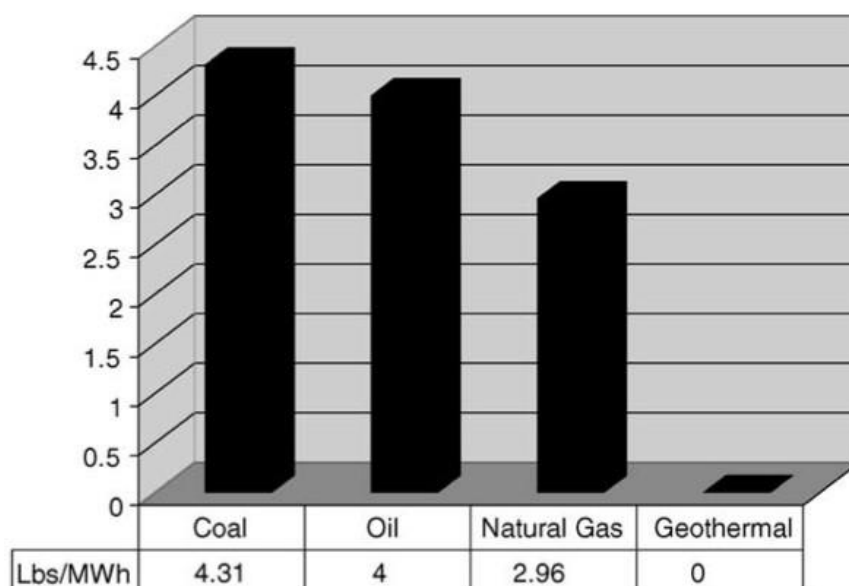


Figura 60: Comparación de emisiones de NO_x. [23]

5.4. Materia particulada (PM)

Las plantas que emplean carbón o petróleo como fuente de energía emiten a la atmósfera enormes cantidades de partículas de muy pequeño diámetro, como PM₁₀ (partículas de menos de 10 µm de diámetro) o PM_{2,5} (partículas de menos de 2,5 µm de diámetro). Estas partículas, más finas que el cabello humano, generan problemas respiratorios, y las de menor tamaño son capaces incluso de llegar al torrente sanguíneo, pudiendo llegar a provocar la muerte. En el caso de las centrales geotérmicas, las emisiones de partículas están limitadas a las producidas en la torre de refrigeración, donde pequeñas partículas son arrastradas en la evaporación del agua de la torre encargada de refrigerar el ciclo. Estas emisiones también se producen en cualquier central con un sistema de refrigeración, y son insignificantes si las comparamos con las producidas en la combustión de combustibles fósiles como puede verse en la FIGURA 61:

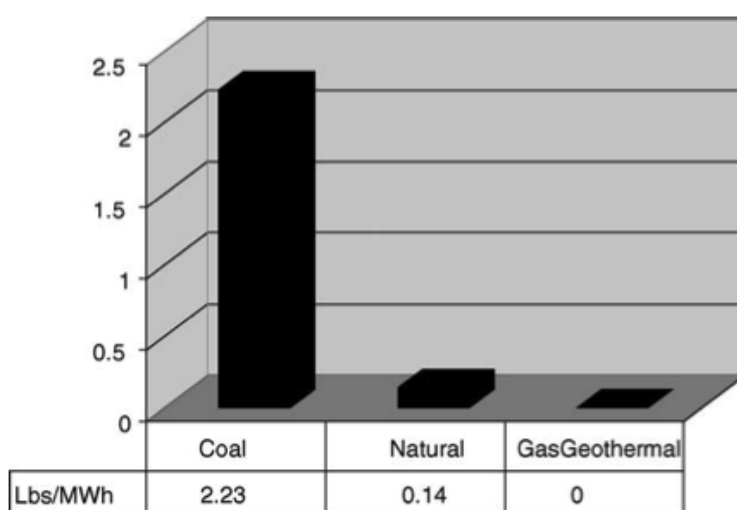


Figura 61: Comparación de emisiones de materia particulada. [23]

5.5. Dióxido de carbono (CO₂)

El dióxido de carbono es un gas de efecto invernadero que absorbe y emite radiación infrarroja, con lo que contribuye al aumento de la temperatura de la superficie terrestre. Actualmente, la concentración de CO₂ en la atmósfera es superior a las 400 ppm, lo que supone un aumento de más del 43% desde el comienzo de la época industrial. Este aumento es debido, principalmente, al uso de combustibles fósiles como fuente de energía. Se trata, además, del principal causante de la acidificación del océano al formar ácido carbónico cuando se disuelve en el agua. Los estudios indican que no existen precedentes de concentraciones tan altas de este gas en, al menos, los últimos 650.000 años.

Existen acuerdos internacionales, como el Protocolo de Kioto, o el más reciente Acuerdo de París, que tienen como objetivo la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. A pesar de estos acuerdos, tal y como muestra la curva Keeling (FIGURA 62) en la que se puede observar la variación en la concentración de CO₂ en la Tierra desde 1958, la concentración de dióxido de carbono aumenta cada año y cada vez más rápido.

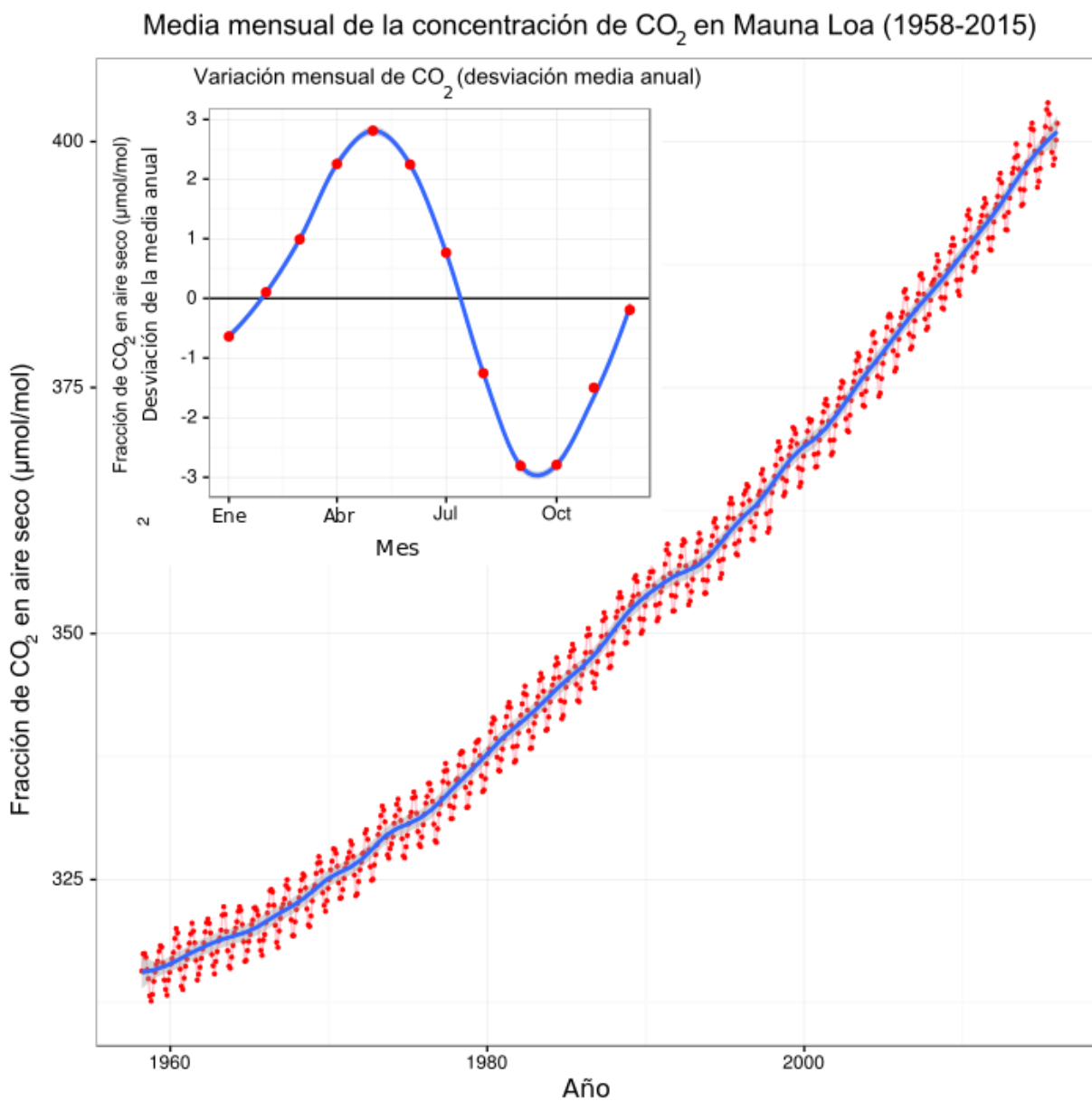


Figura 62: Curva Keeling. Concentración de CO₂ medidas en el observatorio de Mauna Loa (Hawái). [25]

Los sistemas geotérmicos son fuentes naturales de CO₂, con lo que es inevitable que durante la perforación o durante la explotación del yacimiento una pequeña parte de este gas escape a la atmósfera, aunque sigue sin ser comparable con las emisiones producidas como consecuencia de la combustión de combustibles fósiles, como muestra la FIGURA 63.

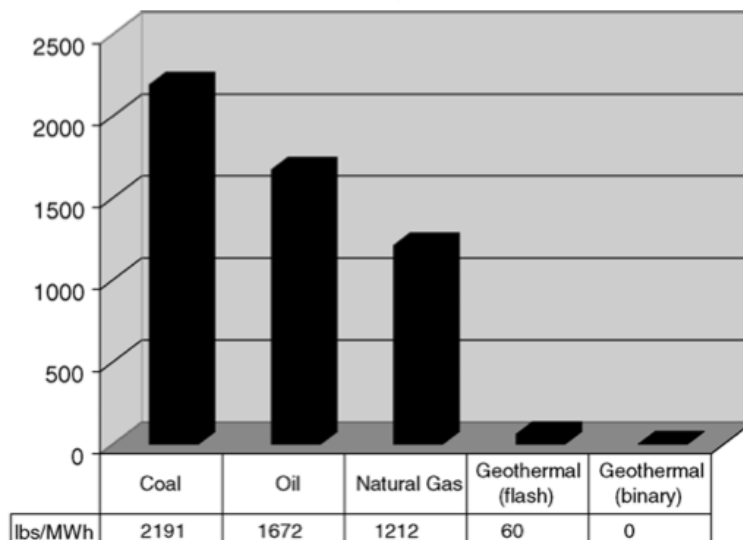


Figura 63: Comparación de emisiones de CO₂. [23]

6. Secuestro de CO₂

El secuestro de dióxido de carbono consiste en el almacenamiento subterráneo de este gas. Con ello, se puede evitar la emisión de grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera, o incluso se podrían llegar a usar sistemas de captación de CO₂ para retirar parte del CO₂ presente ya en la atmósfera. El problema que presentan estos sistemas de captación es que requieren grandes cantidades de energía, con lo que en la mayoría de las centrales eléctricas convencionales requeriría quemar combustible adicional, que generaría más emisiones, para poder captar y almacenar el CO₂.

En una planta geotérmica, donde el fluido de trabajo es el CO₂, el fluido que se desea secuestrar, este problema desaparece. En este caso, el secuestro se realiza de forma natural, sin incurrir en gastos adicionales, ya que parte del fluido inyectado al yacimiento, sea cual sea este, queda almacenado en su interior. En estudios realizados en sistemas EGS con circulación de agua en periodos de tiempo de meses hasta casi un año sugieren que las pérdidas de fluido que se producen suponen aproximadamente un 5% del fluido inyectado [26]. De las distintas configuraciones de ciclo termodinámicos analizadas en el APARTADO 4.6. de este trabajo se puede obtener una relación entre el flujo másico de CO₂ y la potencia neta de la central que se mantiene aproximadamente constante independientemente del ciclo termodinámico elegido. Por cada MW eléctrico generado, el flujo másico de CO₂ que requiere la central es de, aproximadamente, 23 kg/s en el primer periodo, y de 35 kg/s en el segundo periodo. Asumiendo un 5% de pérdidas de fluido, las pérdidas de CO₂ supondrían 1,15 y 1,75 kg/s por cada MWe durante el primer y el segundo periodo respectivamente.

Para tener una idea de lo que esto supone, una planta de carbón genera, aproximadamente, 0,33 kg/s de CO₂ por cada MWe producido, por lo que por cada MWe producido en una central geotérmica de este tipo podría secuestrarse el CO₂ generado por la producción de 3,45 y 5,25 MWe en una central de carbón en los distintos periodos respectivamente. En la siguiente tabla se muestra la cantidad de CO₂ secuestrada y su equivalente con una central eléctrica de carbón que genere la misma cantidad de CO₂, para los ciclos Brayton simple y con regeneración:

	Periodo	Potencia (MW)	CO ₂ secuestrado (kg/s)	Equivalente central de carbón (MW)
Ciclo Brayton simple	Primero	46,59	53,58	160,74
	Segundo	32,86	57,51	172,53
Ciclo Brayton con regeneración	Primero	68,09	78,3	234,9
	Segundo	39,97	69,95	209,85

Tabla 16: Comparativa de capacidad de secuestro de CO₂. Elaboración propia

7. Sismicidad inducida

Algunas de las operaciones necesarias para la explotación de yacimientos geotérmicos alteran las condiciones naturales de dicho yacimiento. En un EGS, comúnmente es necesario realizar procesos de fracturación de las rocas del yacimiento para aumentar la escasez de permeabilidad natural que estos suelen presentar. Además, para mantener la producción de potencia constante es necesario estar constantemente inyectando fluido en el yacimiento. Ambos procesos conllevan la inducción de actividad sísmica, con lo que hay que tener en cuenta la magnitud de la misma y los efectos que puede producir.

7.1. Fracturación

En este caso, la fracturación, aunque suele ser hidráulica, podría realizarse empleando el propio fluido de trabajo (CO₂), de forma que no quede atrapado en el yacimiento un fluido distinto al utilizado en la operación de la central con el que se puedan producir interacciones no deseables. En cualquier caso, independientemente del fluido utilizado, la fracturación, por definición es una forma de actividad sísmica inducida, en la que la presión del fluido inyectado supera la tensión de rotura de las rocas, con lo que se producen fracturas en ellas. Sin embargo, no se conocen casos donde los procesos de fracturación hayan inducido terremotos capaces de producir graves daños, es decir, de magnitudes superiores a 5 (daños leves o moderados) o 6 (graves daños) en la escala Richter.

7.2. Inyección de fluido

La inyección de fluido durante el periodo de explotación del yacimiento, aunque se realice a presiones por debajo de la tensión límite de rotura de las rocas, también inducen actividad sísmica en la zona. Esta es predominantemente de baja magnitud, siendo el terremoto de mayor magnitud el ocurrido en el complejo geotérmico The Geysers, en el norte de California en 1980 con una magnitud de 4,6; cuando la producción de fluido estaba en su pico más alto. Desde este caso aislado, solo se han producido unos pocos terremotos de magnitud 4, y en el resto de campos geotérmicos del mundo casi toda la actividad sísmica inducida ha sido de magnitud inferior a 3, valores de magnitud que en la inmensa mayoría de los casos no son capaces de producir ningún tipo de daño, y que incluso pueden llegar a ni siquiera ser percibidos por el ser humano [27].

El aumento de la actividad sísmica inducida por la inyección de fluido en el yacimiento se justifica según las siguientes hipótesis:

- **Aumento de la presión en el interior de los poros:** es posible el aumento del número de fracturas, y por tanto de sismicidad, debido al incremento de la presión en el interior de los poros de las rocas. La presión en torno a los pozos de inyección es localmente mayor con respecto al resto del yacimiento, con lo que en esta zona es relativamente sencillo que se produzcan fracturas adicionales a través de los poros, donde la tensión máxima capaz de aguantar la roca disminuye.
- **Descenso de la temperatura:** la interacción que se produce entre el fluido, que entra frío al yacimiento, y la roca caliente produce la contracción de estas últimas. Durante la contracción se pueden producir nuevas fracturas, o el crecimiento de las ya existentes.

- **Cambio de volumen:** según se inyecta o se extrae fluido del yacimiento, las rocas son sometidas a esfuerzos tanto de compresión como de tracción, lo que puede afectar a aquellas que se encuentren próximas al límite de rotura, produciendo un fenómeno, como los que se producen en las minas, conocido como “rockbursts”, o estallidos de rocas. Este fenómeno se produce como consecuencia de la adaptación del material rocoso a las nuevas condiciones de volumen y esfuerzos.
- **Alteración química de la superficie fracturada:** la interacción del fluido con la roca no es solo térmica y física. El fluido también interacciona químicamente, con lo que puede modificar la superficie de la roca en contacto con el mismo, reduciendo, por ejemplo, el coeficiente de fricción entre las rocas, lo que produciría deslizamientos entre ellas, generando actividad sísmica, generalmente de baja magnitud (microsismos). En el caso del CO₂, se trata de un gas muy poco reactivo con muchas aplicaciones como gas inerte (extintores, soldaduras, ...), y en cualquier caso, mucho menos reactivo que el agua, con lo que la interacción con la superficie rocosa debe ser mínima.

8. Estudio económico

Una vez diseñadas las distintas alternativas de ciclos termodinámicos para la central geotérmica toca analizar la viabilidad económica del proyecto. Para ello, en primer lugar, habrá que calcular tanto la inversión inicial necesaria, como los costes derivados de la operación y mantenimiento de la misma. Una vez hecho esto, se podrá proceder al cálculo de los beneficios, y con ellos, al análisis financiero.

8.1. Costes

En este apartado se va a calcular la inversión inicial necesaria para la construcción de la central geotérmica. También se calcularán los costes del fluido de trabajo, así como los derivados de la operación y mantenimiento de la central. Los cálculos se van a realizar tanto para el ciclo Brayton simple como para el ciclo Brayton con regeneración, de forma que se pueda realizar una comparación entre ambas configuraciones y poder determinar por tanto la opción más rentable.

8.1.1. Inversión inicial

En el desarrollo de un proyecto geotérmico, los costes derivados de la perforación de los pozos constituyen el componente más representativo de la inversión. Actualmente, la tecnología de perforación utilizada en la geotermia es la empleada por la industria minera, petrolera y de gas. El coste de perforación crece exponencialmente con la profundidad como puede verse claramente en la FIGURA 64. La perforación de dos pozos a una profundidad de 5 km tiene un coste aproximado de 17 M€ [28]. A esto hay que añadirle el coste de adquisición del terreno y los costes de transporte y levantamiento de la plataforma y maquinaria necesarias para la perforación, que Heidinger [29] estima en 1 M€ y 0,5 M€ respectivamente.

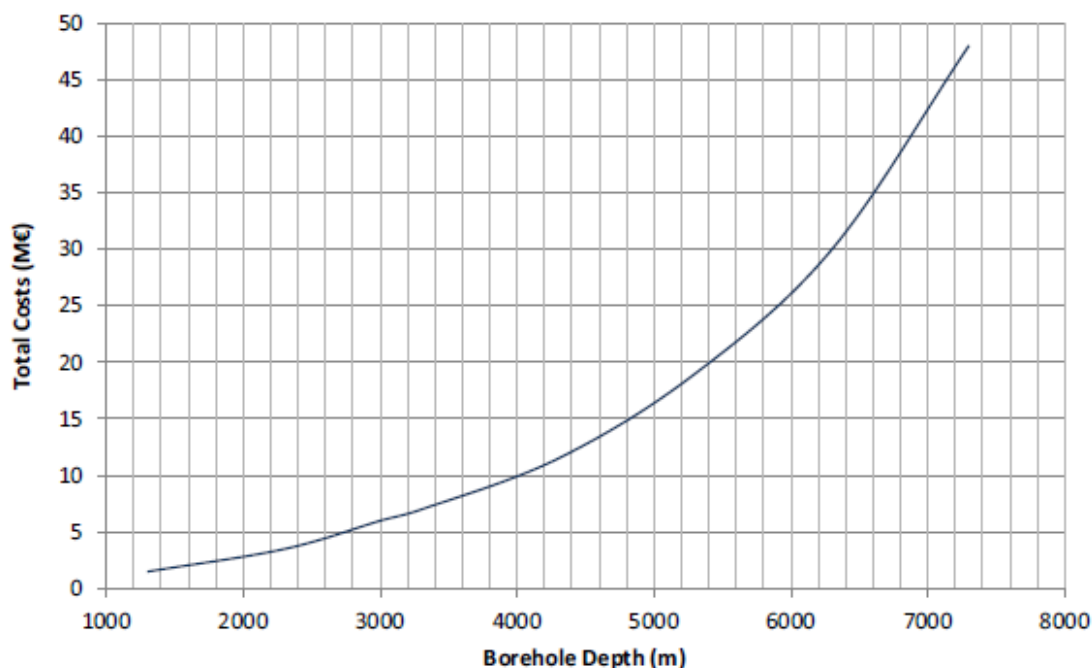


Figura 64: Costes de perforación en función de la profundidad (2 pozos, costes de movilización y perforación, revestimiento incluido). [28]

Sin embargo, antes de realizar las perforaciones, es necesario realizar estudios previos sobre el terreno para poder asegurar la existencia del yacimiento geotérmico necesario bajo el suelo, que conlleven también una serie de costes.

En primer lugar, es necesaria una inspección topográfica preliminar, con el fin de determinar la probabilidad de la existencia de un yacimiento geotérmico adecuado para su explotación comercial. Su coste depende de la información existente previamente sobre la zona. Si la información básica de la geología de la zona en cuestión es conocida, el coste puede variar entre 0,5 y 1 M€, mientras que, si es desconocida, el coste puede ascender hasta los 5 M€ [30]. Se tomará en este caso el valor de 1M€, ya que las características geológicas de la zona se pueden obtener del IGME (Instituto Geológico y Minero de España).

En una segunda fase, para confirmar la existencia del yacimiento, se realizan una serie de exploraciones topográficas a nivel superficial, con el fin, además, de evaluar las características térmicas, geológicas, físicas de la zona. Para ello, se toman muestras de las rocas de la superficie, de fuentes termales próximas, en el caso de haberlas, se mide la conductividad o resistividad de estas rocas superficiales, se buscan distribuciones anormales en la densidad de las rocas y se realizan exploraciones sísmicas con ondas para intentar identificar y mapear estructuras geológicas grandes con límites que puedan llevar a fallas y fracturas, y se realizan perforaciones de orificios no aptos para un uso comercial para obtener datos sobre el gradiente de temperatura del terreno. Los costos de estas exploraciones pueden alcanzar entre 1 y 2 M€, a los que habría que sumar de 0,5 a 1 M€ adicionales por cada orificio realizado para estudiar el gradiente térmico [30]. Se tomará en este caso un valor de 3 M€ como coste total de esta segunda fase.

Dentro también de estos estudios preliminares, se deben realizar perforaciones de prueba para determinar definitivamente tanto la existencia del yacimiento geotérmico como su localización y potencial exactos. Para ello, suelen realizarse de 3 a 5 pozos de tamaño real, aunque en su lugar, pueden realizarse orificios con un diámetro menor, y a menor profundidad, para los cuales, se requiere un equipo de perforación más liviano, con lo que conllevarían aproximadamente el 50% del coste de un pozo real [30]. El coste de esta fase se asumirá, en este caso, como el 50% del coste de perforación de 4 pozos reales, es decir, 17 M€.

Por último, hay que considerar el coste de estimular la permeabilidad del yacimiento, el cual Heidinger [29] establece en 1 M€, que es independiente de la profundidad del yacimiento.

Por otro lado, hay que calcular la inversión asociada a la adquisición de los componentes del ciclo termodinámico: turbina, compresor, intercambiadores de calor, torre de refrigeración, bomba del agua de refrigeración y generador eléctrico. El coste de todos estos elementos se va a agrupar en el que se va a denominar como coste superficial y que se puede calcular mediante la siguiente ecuación [31]:

$$C_s = 0,88[(-0,9 \pm 4,6) + (1 \pm 0,1)P] \quad (20)$$

Donde C_s es el coste superficial en M€ y P es la potencia de la central en MW. Esta ecuación se ha obtenido analizando los costes del conjunto de estos componentes en diferentes centrales geotérmicas ya existentes con un rango de potencias entre 20 y 60

MW. En este caso, la central que implementa el ciclo Brayton con regeneración supera los 60 MW de potencia, pero al tener un valor próximo, se considerará válida esta ecuación. Además, se va a hacer uso de la ecuación con sus límites superiores de forma que se sobrestime el coste real de la central, con lo que la ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$C_S = 3,256 + 0,968P \quad (21)$$

En la TABLA 17 se muestran los costes de inversión calculados para ambos ciclos:

	Ciclo Brayton Simple	Ciclo Brayton con Regeneración
Adquisición del terreno	1	
Transporte y levantamiento de plataforma y maquinaria	0,5	
Inspección topográfica preliminar	1	
Exploración topográfica superficial	3	
Perforaciones de prueba	17	
Perforación de pozos de inyección y producción	170	
Estimulación de la permeabilidad	1	
Total Perforación (M€)	193,5	
Coste superficial	48,36	69,17
Total Inversión Inicial (M€)	241,86	262,67

Nota: Todas las cifras en millones de euros.

Tabla 17: Costes de la inversión inicial del proyecto. Elaboración propia.

Cabe destacar como más de dos terceras partes de la inversión corresponden a los costes derivados de la perforación de los pozos. De aquí se deduce la gran importancia del gradiente geotérmico en este tipo de proyectos, ya que puede permitir ahorrar millones de euros. De hecho, como se va a comprobar va a ser un factor determinante en la viabilidad económica del proyecto.

8.1.2. Costes de operación y mantenimiento

Los costes de operación y mantenimiento (O&M) de la central comprenden, principalmente, los costes de los salarios de los empleados de la central, así como los costes del equipamiento destinado a ambas actividades. En este caso, por tratarse de una central geotérmica, se van a incluir los costes derivados del mantenimiento del campo geotérmico y los costes de restauración de pozos. Estos últimos se originan cuando es necesario reemplazar o restaurar los pozos originales, con lo que sus costes son menores a los de dichos pozos.

Los costes de O&M depende de la energía producida por la central, en lugar de su potencia. Estévez [32] establece un valor de 2,8 UScents/kWh para los costes de O&M, lo que es equivalente a 24,64 €/MWh.

Para poder calcular la energía que produce la central se necesita conocer el factor de capacidad de la misma. El factor de capacidad, o factor de planta, es la relación entre la energía real generada por una central durante un periodo de tiempo y la energía que podría haber generado si hubiese trabajado a plena carga durante el mismo periodo de tiempo. En centrales geotérmicas, el factor de capacidad oscila en valores próximos al 75% (FIGURA 65), aunque, como se ha demostrado [33], puede llegar a alcanzar valores de hasta el 96%, siendo este tipo de centrales renovables las que presentan un valor mayor de este parámetro.

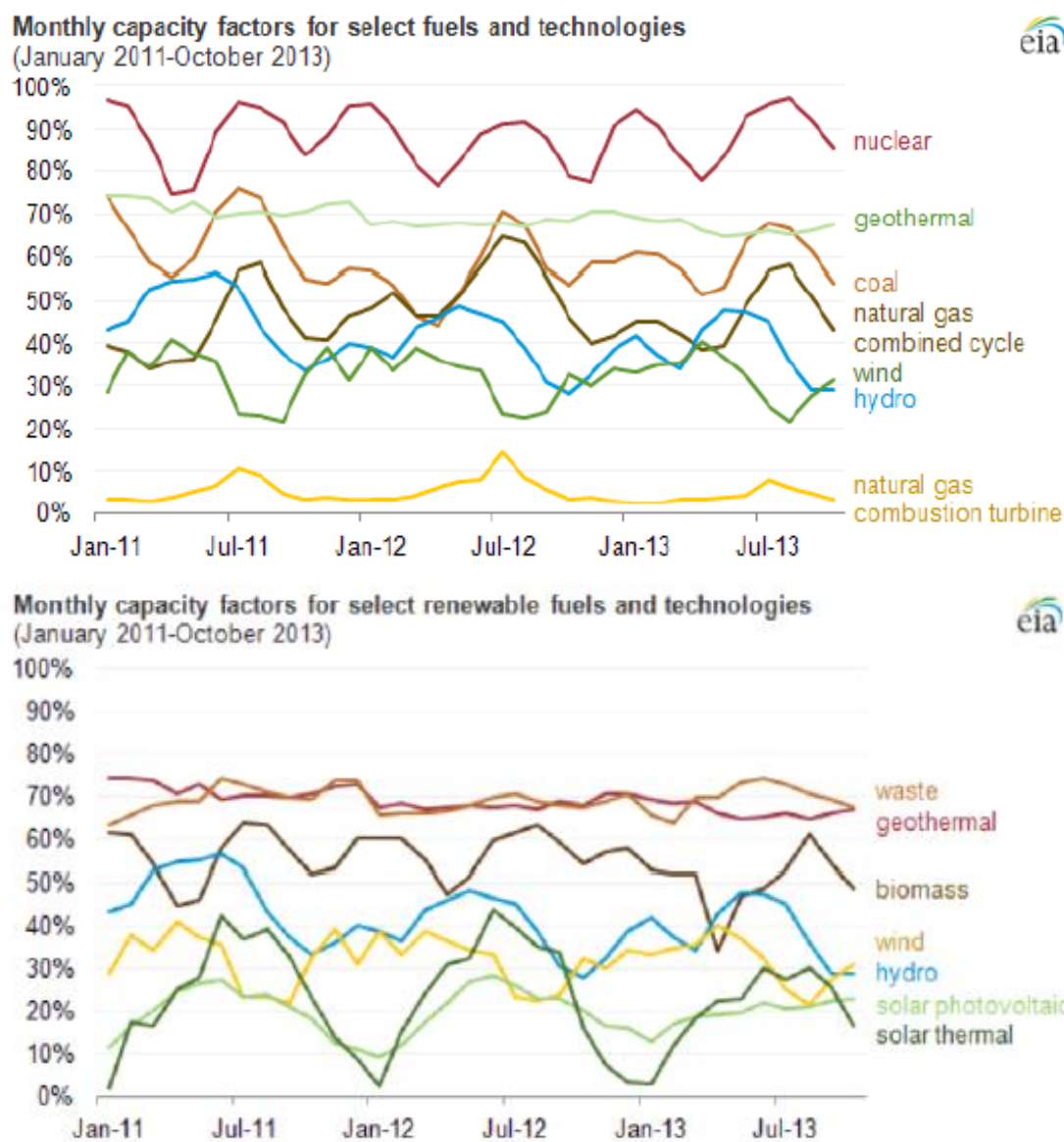


Figura 65: Factor de capacidad mensual de diferentes tecnologías de generación eléctrica. [34]

Con un factor de capacidad del 90%, el equivalente a trabajar 7884 h al año a plena carga, los costes de O&M de la planta ascienden a 9,05 M€/año para el ciclo Brayton simple y 13,23 M€/año para el ciclo Brayton con regeneración. Estos valores se van a considerar durante ambos periodos de funcionamiento, ya que, aunque en el segundo periodo se produce un descenso de la potencia y la energía generada, no se producen cambios ni en la infraestructura ni en la maquinaria, de las que depende el valor de estos costes.

8.1.3. Costes del CO₂

El CO₂ necesario para el ciclo, así como el CO₂ que va quedando secuestrado en el yacimiento geotérmico de forma natural durante su explotación, puede obtenerse de cualquier tipo de central térmica que queme combustible, ya sea de origen fósil o biomasa, y que cuente con un sistema de captura de CO₂. Rubin, Davison y Herzog [35] establecen el coste de captación de este gas para una central térmica de carbón pulverizado en 40,5 €/tCO₂ capturada, y el coste de transporte del mismo en 8,8 €/tCO₂. Estas centrales, al evitar la emisión a la atmósfera de este CO₂, pueden vender sus derechos de emisión, EUA (European Emissions Allowances). Por lo tanto, el coste asociado a la captura y transporte de CO₂ es de aproximadamente 49,3 €/tCO₂. El precio de cada unidad de EUA, es decir, el precio por poder emitir una tonelada de CO₂ a la atmósfera se encuentra actualmente en torno a los 5 €, con lo que la planta suministradora del CO₂ podría obtener un beneficio por la venta de este contaminante.

Si se considerase el valor de 49,3 €/tCO₂ para el cálculo del coste del fluido de trabajo de la central, se obtendrían los siguientes resultados sobre el coste de adquisición anual de CO₂:

	Ciclo Brayton Simple	Ciclo Brayton con Regeneración
Coste de CO ₂ (Periodo 1)	74,97	109,56
Coste de CO ₂ (Periodo 2)	80,47	97,88

Tabla 18: Coste anual de CO₂ en M€/año. Elaboración propia

Habría que considerar además el coste del CO₂ que hay que inyectar inicialmente en el yacimiento antes de comenzar con su explotación. La masa de CO₂ que hay que inyectar se calcula de la siguiente forma:

$$m_{CO_2_inicial} = \rho_{yac} \cdot V_{yac_per} \quad (22)$$

Donde $m_{CO_2_inicial}$ es la masa de CO₂ inicial, ρ_{yac} (254,545 kg/m³) es la densidad del fluido en las condiciones de presión y temperatura del yacimiento y V_{yac_per} (24,4 km³) es el volumen permeable del yacimiento, con lo que se obtiene una masa inicial de 6,21 Mt de CO₂, lo que supone que habría que aumentar la inversión inicial en 306,2 M€.

Sin embargo, tras los objetivos fijados en el acuerdo de París de 2015 para mantener el calentamiento global por debajo de los 2°C/año, se espera que el mercado de derechos de emisión repunte, y el precio de los EUA vuelva, o incluso supere, sus valores previos a la crisis económica de en torno a 22 €/tCO₂. Tras el último Think 20, la cumbre paralela al G20 y organizada por esta, donde se reúnen numerosos líderes de opinión mundiales, varios economistas defendieron que es necesario establecer un precio al CO₂ superior al del actual mercado. Entre ellos, el profesor británico Lord Nicholas Stern, autor del famoso informe sobre el cambio climático que lleva su nombre, afirmó lo siguiente: "Para mantener el calentamiento global por debajo del objetivo de dos grados, fijado en París, el dióxido de carbono debe tener, hasta 2020, al menos un precio de entre 40 y 80 dólares por tonelada". Además, se estima que las tecnologías de captura de CO₂, que actualmente

aumentan en más de un 40% los costes de generación eléctrica de las centrales que implementan estos sistemas, en un futuro solo supondrán un aumento de los costes de generación de entre un 10% y un 20%.

Tanto el aumento del precio por emitir CO₂ a la atmósfera, como el desarrollo de nuevas tecnologías de captura que disminuyan los costes de la misma contribuirán a eliminar los costes de adquisición del CO₂, a parte de los evidentes beneficios medioambientales que supondría.

Por ello, se van a considerar dos escenarios: el Escenario 1, donde la central geotérmica asuma los costes de captura y transporte del CO₂, y el Escenario 2, donde estos costes sean nulos.

8.2. Precio de la electricidad generada

Una vez calculados tanto la inversión inicial como los costes de operación y mantenimiento de la planta se va a proceder al cálculo del precio de la energía eléctrica generada. Para ello, se va a emplear el LCOE o Costes Nivelados de la Energía, que permite obtener un valor bastante aproximado al valor real. La expresión que define el LCOE es la siguiente:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^n (I_t + C_{O\&M,t} + C_{CO_2,t})(1+r)^{-t}}{\sum_{t=0}^n E_t (1+r)^{-t}} \quad (23)$$

Donde t es el número de años transcurridos, n es el número de años hasta el desmantelamiento de la planta, I_t es la inversión realizada, $C_{O\&M,t}$ es el coste anual de O&M, $C_{CO_2,t}$ es el coste anual del CO₂, E_t es la energía anual generada y r es la tasa de interés del proyecto.

Hay que tener en cuenta que la inversión de un proyecto geotérmico no se realiza toda en el primer año, sino que los estudios y exploraciones del campo geotérmico, su perforación y la construcción de las instalaciones llevan varios años. En la FIGURA 66 se muestra un ejemplo de cómo se va desarrollando el proyecto de una planta geotérmica con una capacidad instalada de aproximadamente 50 MW.

Con una tasa de interés del 6%, y teniendo en cuenta que los valores de energía generada cambian en función del periodo de funcionamiento, se obtienen los resultados que figuran en la TABLA 19 y TABLA 20.

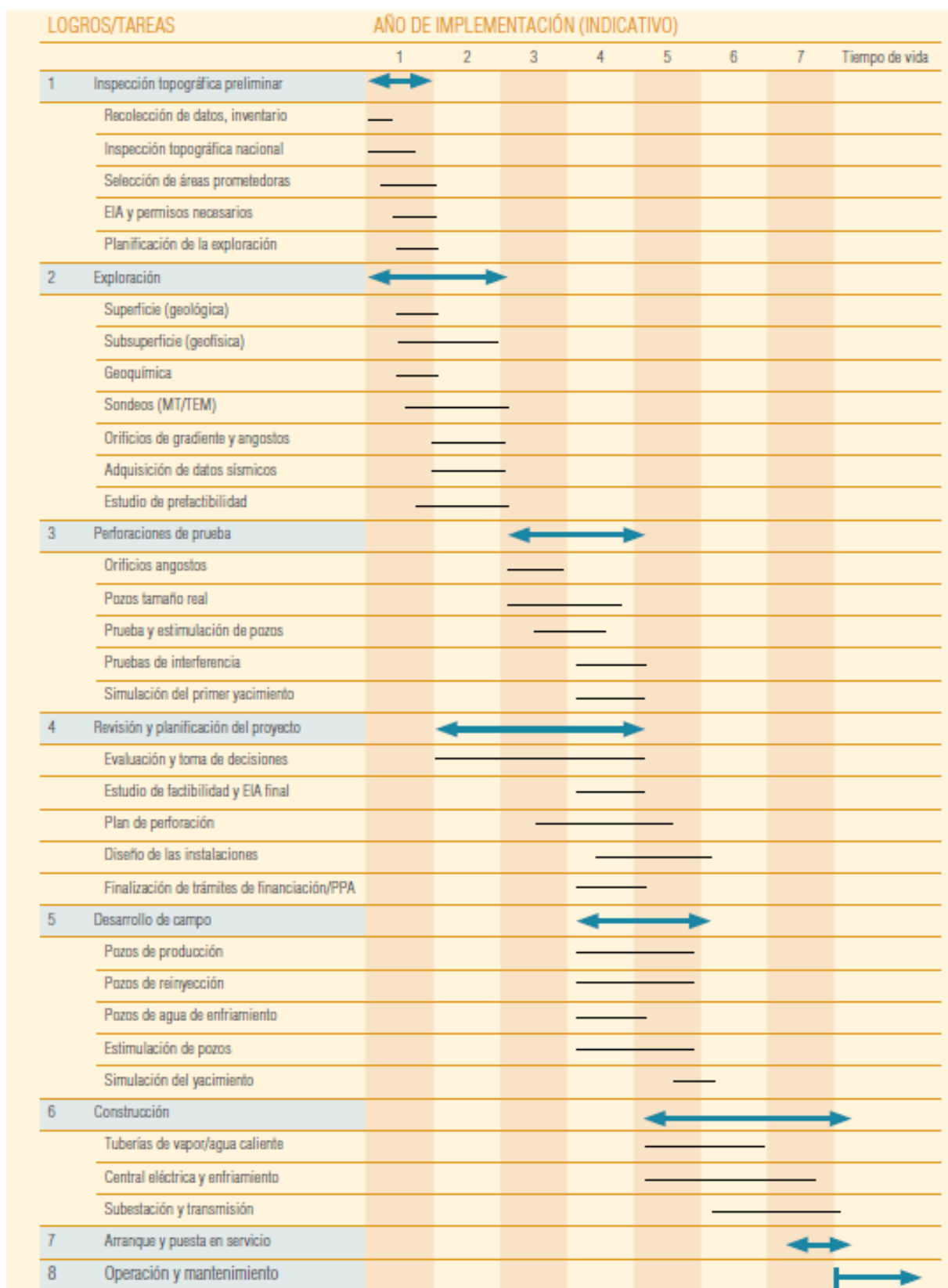


Figura 66: Desarrollo de un campo geotérmico para una unidad de aproximadamente 50 MW. [30]

- Escenario 1:

	Ciclo Brayton Simple		Ciclo Brayton con Regeneración	
Periodo	1	2	1	2
Inversión inicial (M€)	548,06		568,87	
Costes de O&M (M€/año)	9,05		13,23	
Costes de CO ₂ (M€/año)	74,97	80,47	109,56	97,88
Energía generada (kwh/año)	367315560	259068240	536821560	315123480
LCOE (€/MWh)	394,47		357,9	

*Tabla 19: Costes nivelados de la energía para las dos configuraciones (Escenario 1).
Elaboración propia.*

- Escenario 2:

	Ciclo Brayton Simple		Ciclo Brayton con Regeneración	
Periodo	1	2	1	2
Inversión inicial (M€)	241,86		262,67	
Costes de O&M (M€/año)	9,05		13,23	
Energía generada (kwh/año)	367315560	259068240	536821560	315123480
LCOE (€/MWh)	86,46		74,75	

*Tabla 20: Costes nivelados de la energía para las dos configuraciones (Escenario 2).
Elaboración propia.*

Puede apreciarse como el sistema de regeneración, aunque aumenta tanto la inversión como los costes de O&M, al producir más energía reduce considerablemente los costes de producción de la misma. Cabe destacar el gran efecto negativo sobre el precio de la energía que tiene incluir los costes del CO₂. Comparando estos costes con los de la FIGURA 67, los costes de la energía en el Escenario 1 son muy superiores a los que se obtienen normalmente para centrales geotérmicas. Sin embargo, en el Escenario 2, los costes si se ajustan a lo esperado, o incluso son algo menores.

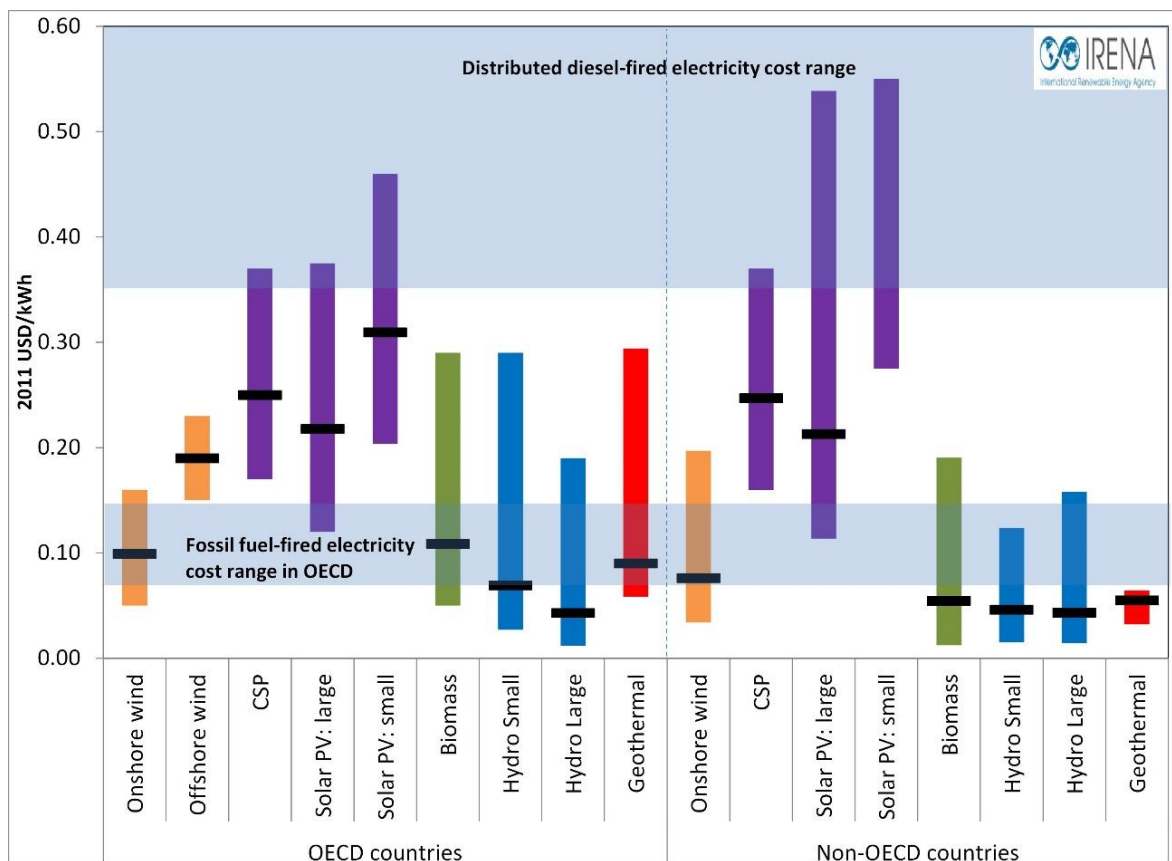
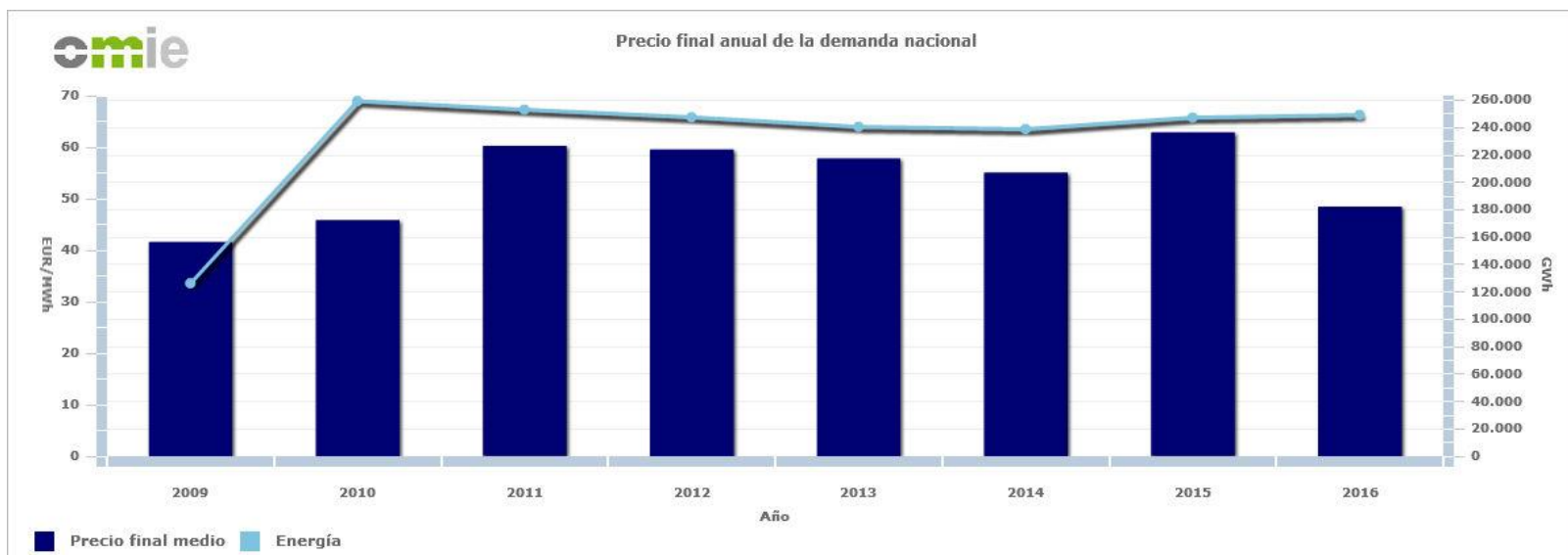


Figura 67: Costes nivelados de la energía para distintas tecnologías y en función de si son o no miembros de la OCDE. [36]

8.3. Análisis de viabilidad

En este apartado se va a estudiar la viabilidad económica del proyecto a través de tres indicadores: VAN, TIR y el tiempo de recuperación de la inversión o Pay Back. Estos tres indicadores de rentabilidad pueden utilizarse tanto para evaluar un proyecto en particular como para comparar distintas alternativas entre si y elegir la más rentable, y todos ellos dependen de los flujos de caja que se producen durante la vida del proyecto, con lo que, en primer lugar, hay que calcular los ingresos y gastos de la planta.

Los ingresos de una central eléctrica provienen de la venta de la energía eléctrica producida. Se tomará como precio de la electricidad el valor medio del precio medio del mercado eléctrico español desde el año 2009 hasta el año 2016 (FIGURA 68).



Año	Precio final medio (€/MWh)
2.009	41,62
2.010	45,83
2.011	60,22
2.012	59,57
2.013	57,80
2.014	55,05
2.015	62,85
2.016	48,43
Precio medio de la electricidad	53,92

Figura 68: Distribución (arriba) y valores (abajo) del precio medio anual de la demanda nacional para el periodo 2009-2016. [37]

Los ingresos, por tanto, se calcularán a través de este precio de venta y la electricidad generada:

$$Ingresos_t = P_{elec} \cdot E_t \quad (24)$$

Los gastos comprenden, además de los costes fijos de O&M y de adquisición del CO₂, los gastos por el pago de impuestos:

$$Gastos_t = C_{O\&M,t} + C_{CO_2,t} + C_{imp,t} \quad (25)$$

Estos costes adicionales ($C_{imp,t}$) se van a calcular como el 40% de los Beneficios Antes de Impuestos (EBIT) del periodo “t” correspondiente.

Para poder proceder al cálculo de estos indicadores hay que estimar el valor de los flujos de caja desde el momento en que se produce el primer desembolso de capital hasta el desmantelamiento de la planta. El valor de estos flujos es el resultado de la diferencia entre los ingresos y los gastos de cada periodo.

A continuación, se muestra un resumen de los flujos de caja para los distintos ciclos, escenarios y periodos de funcionamiento:

- Escenario 1:

	Ciclo Brayton Simple		Ciclo Brayton con Regeneración	
Periodo	1	2	1	2
Ingresos (M€/año)	19,81	13,97	28,95	16,99
Gastos (M€/año)	91,94	95,11	134,4	117,9
Flujo de caja M€/año)	-72,14	-81,14	-105,4	-100,9

Tabla 21: Flujos de caja para las diferentes alternativas (Escenario 1). Elaboración propia.

- Escenario 2:

	Ciclo Brayton Simple		Ciclo Brayton con Regeneración	
Periodo	1	2	1	2
Ingresos (M€/año)	19,81	13,97	28,95	16,99
Gastos (M€/año)	16,97	14,64	24,81	20,03
Flujo de caja M€/año)	2,84	-0,67	4,137	-3,04

Tabla 22: Flujos de caja para las diferentes alternativas (Escenario 2). Elaboración propia.

8.3.1. VAN

El VAN (Valor Actual Neto) permite calcular el valor el valor presente de los flujos de caja futuros originados por una inversión. Para ello, se compara la inversión inicial con los flujos de caja generados y actualizados con una tasa de descuento. Esta tasa de descuento es la tasa de rentabilidad mínima que se espera para el proyecto en cuestión. Si el valor del VAN obtenido es positivo, indica que el proyecto es rentable, ya que proporciona un valor de rentabilidad superior al esperado, mientras que, si es negativo, el valor de la rentabilidad es inferior al esperado e interesaría realizar la inversión en otro proyecto. En varios proyectos con VAN positivo, a priori, sin tener en cuenta otros factores, se escogería el de mayor VAN. La expresión que permite calcularlo es la siguiente:

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+k)^t} \quad (26)$$

La tasa de descuento, k , se va a tomar como 6% y n comprenderá el periodo desde el primer desembolso de la inversión, que como ya se ha indicado se realizará a partes iguales durante 7 años, hasta el desmantelamiento de la central después de sus 35 años de operación, lo que hace un total de 42 años ($n = 41$).

8.3.2. TIR

La TIR (Tasa Interna de Retorno o Tasa Interna de Rentabilidad) indica la rentabilidad del proyecto. Además, es la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero, y por ello, se puede obtener su expresión a partir de la ecuación (26), igualando esta a cero:

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} \quad (27)$$

Para que la inversión se considere rentable, el valor de la TIR debe ser mayor al de la tasa de descuento considerado para el proyecto (en este caso mayor al 6%), y entre dos proyectos que cumplan esto, se escogerá el de mayor TIR.

8.3.3. Payback

El Payback permite estimar en que momento de la vida del proyecto se recupera el valor de la inversión inicial. Al igual que en el caso del TIR, su valor puede obtenerse a partir de la definición del VAN, (26), ya que cuando se alcanza el periodo de recuperación de la inversión, el VAN es igual a cero:

$$0 = \sum_{t=0}^{Payback} \frac{FC_t}{(1+k)^t} \quad (28)$$

En principio, mediante este criterio, se consideraría realizar una inversión siempre y cuando se obtenga un valor positivo para el Payback, es decir, siempre que se recupere la inversión inicial. Sin embargo, esto puede llevar a invertir en un proyecto con un Payback muy elevado con el que se tarda mucho tiempo en recuperar la inversión y que impide invertir en proyectos con una rentabilidad mayor y con los que se recupera más rápido la inversión realizada.

8.3.4. Resultados

Los resultados del análisis de la viabilidad económica de las diferentes alternativas se pueden consultar en el ANEXO III. En la siguiente tabla se muestra un resumen de estos resultados:

	Ciclo Brayton Simple		Ciclo Brayton con Regeneración	
Escenario	1	2	1	2
VAN (M€)	-1.157,88	-144,66	1440,94	-141,77
TIR (%)	-203,27	-1,7	-205,31	-1,23

*Tabla 23: Indicadores de viabilidad económica para las distintas alternativas.
Elaboración propia.*

Para las distintas alternativas, puesto que tanto el VAN como la TIR son negativas, no tiene sentido calcular el Payback ya que es imposible recuperar la inversión inicial. En el primer escenario, los elevados costes del CO₂ hacen que los gastos superen a los ingresos en todo momento, con lo que en ningún momento se obtienen beneficios. En el segundo escenario, aunque los flujos de caja son positivos durante los 35 años de operación de la planta, no se consigue un volumen de beneficios suficiente para recuperar la inversión.

A la vista de estos resultados, ninguna de las alternativas analizadas resulta rentable. Los casos más desfavorables se corresponden con el Escenario 1, ya que, como se viene advirtiendo, los costes de compra del CO₂ secuestrado en el yacimiento superan por mucho los ingresos por la venta de la electricidad, lo que hace inviables económicamente estas alternativas.

En el Escenario 2, a pesar de considerar nulos los gastos por compra de CO₂, las distintas configuraciones siguen siendo inviables debido principalmente a que la planta requiere una inversión muy alta en relación con la potencia que se obtiene. En el APARTADO 8.1.1., se ha destacado la gran influencia de los costes de perforación y su carácter determinante en la viabilidad económica de las centrales geotérmicas. Cabe destacar como en este escenario, el ciclo Brayton con regeneración consigue un valor tanto del VAN como de la TIR mayor. Esto permite afirmar que cualquier alternativa, siempre que esta sea económicamente viable, obtendrá mejores resultados, tanto termodinámicos como económicos, si se implementa en ella un sistema de regeneración.

Para que, sin realizar modificaciones en el ciclo, las alternativas correspondientes al Escenario 2 resulten rentables requerirían de un precio de venta de la energía eléctrica superior al precio medio adoptado en los cálculos. En el caso del ciclo Brayton simple, se obtendría un valor de la TIR nula con un precio de la electricidad de 64,3 €/MWh, y una TIR igual a la tasa de descuento buscada del 6% con un precio de 125 €/MWh. En cuanto al ciclo Brayton con regeneración, la TIR sería nula para un precio de la electricidad de 59,55 €/MWh, y del 6% con un precio de 103,8 €/MWh. Por lo tanto, sería muy complicado obtener la rentabilidad mínima buscada del 6%, ya que en España los precios de la electricidad no suelen alcanzar los valores superiores a los 100 €/MWh requeridos, y solo lo hacen, en ocasiones, durante los meses correspondientes al invierno. No obstante, sí que sería posible obtener cierta rentabilidad, por debajo de este 6%, ya que los valores del precio necesarios para ello, expuestos en las líneas anteriores, sí que pueden alcanzarse, durante todo el año, en función de la hora y el día.

8.4. Propuestas de mejora

A pesar de que las alternativas analizadas no hayan resultado económicamente viables, existen muchas posibilidades que permitirían, con total seguridad, obtener buenos resultados económicos con el mismo tipo de tecnología.

En primer lugar, como se ha podido comprobar en el APARTADO 4.6.3., añadir al sistema de regeneración los sistemas de interenfriamiento y de recalentamiento de forma simultánea incrementa tanto la potencia como el rendimiento de la central, con lo que se obtendría más energía sin que haya una gran repercusión ni en la inversión inicial ni en los costes de O&M.

Además, sería muy conveniente sobrecalentar el fluido, por dos motivos principalmente. El primero de ellos es que las propiedades termodinámicas del CO₂, como se ha visto en la FIGURA 45 y en la FIGURA 46, mejoran con el incremento de la temperatura, con lo que podrían obtenerse mayores potencias de la turbina. El segundo motivo es la posibilidad de obtener el flujo de CO₂ necesario para satisfacer las pérdidas del mismo en el ciclo del sistema de sobrecalentamiento. Este proceso, aunque podría realizarse empleando colectores solares, de forma que el sistema sea completamente renovable, también se podría realizar mediante la combustión de combustibles fósiles o de biomasa, los cuales generarían en dicha combustión el CO₂ necesario para el ciclo. Se podría, por lo tanto, instalar una cámara de combustión en la propia central, donde realizar el sobrecalentamiento, aunque habría que estudiar la posibilidad de acoplar este ciclo al de una central térmica de carbón, o de gas natural, en la que se puedan utilizar los gases producto de la combustión, aún calientes, para el sobrecalentamiento, y una vez enfriados, separar el CO₂ para emplearlo en el ciclo Brayton. De esta forma, se aseguraría que los costes de compra del CO₂ serían nulos, aumentaría la potencia de la turbina de CO₂, y la central térmica conseguiría reducir sus emisiones y vender sus EUA, con el consiguiente beneficio medioambiental que esto supondría.

Por último, sería conveniente realizar un estudio detallado de algunos de los parámetros utilizados como hipótesis en el diseño del ciclo presentes en el APARTADO 4.4. En particular, los efectos del pinch en el regenerador sobre la potencia y el rendimiento de la planta. En este caso el valor elegido se ha obtenido a partir de la FIGURA 69 en la que se muestra la variación del área, el coste y el calor requerido en función del valor de este parámetro. Puede observarse como, el coste del intercambiador presenta un mínimo para valores del pinch comprendidos entre 10 K y 20 K, por ello se ha empleado el valor medio de 15 K en este proyecto. Sin embargo, puede no ser el valor con el que se alcance el óptimo económico de las diferentes alternativas, ya que este parámetro tiene una gran influencia sobre los resultados de cada ciclo, tanto a nivel termodinámico como a nivel económico. Por ejemplo, un con un valor del pinch de 5 K, la potencia del ciclo Brayton con regeneración aumentaría en 15 MW y el rendimiento lo haría en más de un 4%, con la consiguiente subida del coste del regenerador, aumentos que serían muy superiores en el caso de que se realizasen las mejoras propuestas en los párrafos anteriores de este mismo apartado.

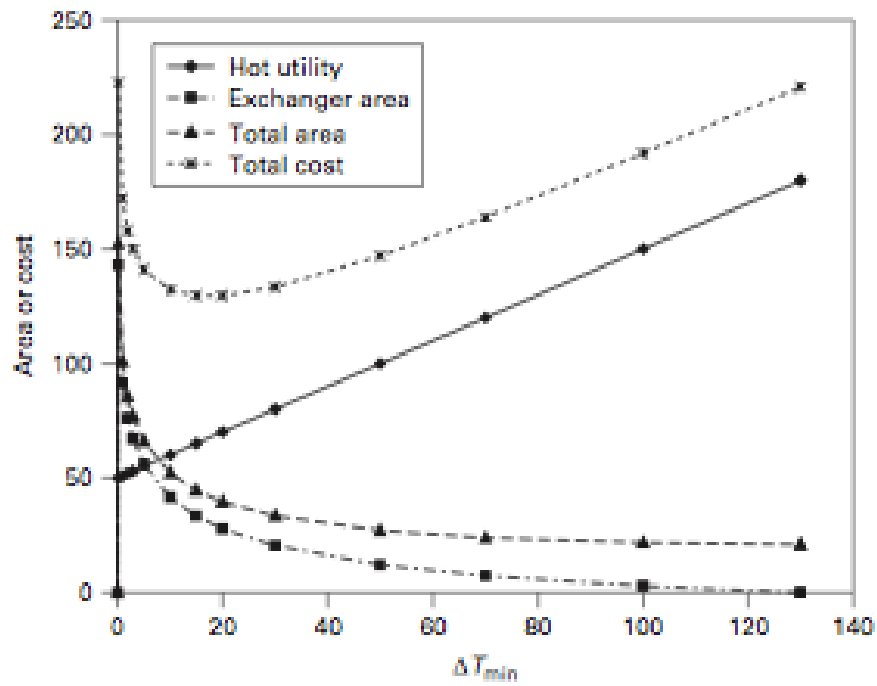


Figura 69: Progresión del calor requerido de fuentes externas, área del intercambiador y coste del intercambiador con el valor de la diferencia mínima de temperatura (pinch).
[38]

9. Marco regulador

Aunque en España, la explotación de los recursos geotérmicos no se encuentre demasiado extendida, y mucho menos cuando se trata de generar electricidad a partir de ellos, si existe una serie de leyes y regulaciones aplicables a este tipo de centrales, las cuales, previsiblemente irán evolucionando según se vaya adquiriendo experiencia con este tipo de tecnologías. En este apartado nos centraremos en la normativa aplicable a nivel estatal, aunque hay que tener en cuenta que existen normativas adicionales, tanto a niveles superiores, como puedan ser las directivas europeas o acuerdos a nivel mundial como los Acuerdos de París de 2015, como a niveles inferiores, en el caso de España la legislación autonómica.

9.1. Explotación del recurso

Los recursos geotérmicos, al igual que otros recursos naturales, son considerados recursos geológicos-mineros, y como tales, son de dominio público, y puede llevarse a cabo su investigación y aprovechamiento por el Estado o por parte de este a particulares que lo soliciten. Como cualquier recurso minero está regulado por la normativa minera, cuya normativa principal se resume en:

- Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas.
- Real Decreto 2857/1978, de 25 de agosto por el que se aprueba el Reglamento General para el Régimen de la Minería.
- Ley 54/1980, de 5 de noviembre, de modificación de la Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas.
- Real Decreto 863/1985, de 2 de abril, por el que se aprueba el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera.

9.2. Generación eléctrica

Las centrales geotérmicas de generación eléctrica, al igual que cualquier otro tipo de central o actividad del sector eléctrico están reguladas por la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico. Además, las instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energías renovables, cogeneración y residuos, están reguladas por el Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, y por la siguiente normativa [39]:

- Corrección de errores de la Resolución de 30 de noviembre de 2015 por la que se convoca la subasta para la asignación del régimen retributivo específico a nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de biomasa situadas en el sistema eléctrico peninsular y a instalaciones de tecnología eólica, y se establecen el procedimiento y las reglas de la misma, al amparo de lo dispuesto en el Real Decreto 947/2015, de 16 de octubre, y en la Orden IET/2212/2015, de 23 de octubre.
- Resolución de 30 de noviembre de 2015 por la que se convoca la subasta para la asignación del régimen retributivo específico a nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de biomasa situadas en el sistema eléctrico peninsular y a instalaciones de tecnología eólica, y se establecen el procedimiento y las reglas de la misma, al amparo de lo dispuesto en el Real

Decreto 947/2015, de 16 de octubre, y en la Orden IET/2212/2015, de 23 de octubre.

- Corrección de errores de la Orden IET/2212/2015, de 23 de octubre, por la que se regula el procedimiento de asignación del régimen retributivo específico en la convocatoria para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de biomasa situadas en el sistema eléctrico peninsular y para instalaciones de tecnología eólica, convocada al amparo del Real Decreto 947/2015, de 16 de octubre, y se aprueban sus parámetros retributivos.
- Orden IET/2212/2015, de 23 de octubre, por la que se regula el procedimiento de asignación del régimen retributivo específico en la convocatoria para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de biomasa situadas en el sistema eléctrico peninsular y para instalaciones de tecnología eólica, convocada al amparo del Real Decreto 947/2015, de 16 de octubre, y se aprueban sus parámetros retributivos.
- Real Decreto 947/2015, de 16 de octubre, por el que se establece una convocatoria para el otorgamiento del régimen retributivo específico a nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de biomasa en el sistema eléctrico peninsular y para instalaciones de tecnología eólica.
- Orden IET/1953/2015, de 24 de septiembre por la que se modifica la Orden IET/1459/2014, de 1 de agosto, por la que se aprueban los parámetros retributivos y se establece el mecanismo de asignación del régimen retributivo específico para nuevas instalaciones eólicas y fotovoltaicas en los sistemas eléctricos de los territorios no peninsulares.
- Resolución de 15 de julio de 2015, de la Dirección General de Política Energética y Minas por la que se inscriben en el registro de régimen retributivo específico en estado de preasignación las instalaciones incluidas en el cupo previsto en la disposición adicional cuarta del Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos; y se declaran no inscritas o inadmitidas el resto de instalaciones que solicitaron su inclusión en dicho cupo.
- Orden IET/1344/2015, de 2 de julio por la que se aprueban las instalaciones tipo y sus correspondientes parámetros retributivos, aplicables a determinadas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.
- Orden IET/1345/2015, de 2 de julio por la que se establece la metodología de actualización de la retribución a la operación de las instalaciones con régimen retributivo específico.
- Orden IET/931/2015, de 20 de mayo, por la que se modifica la Orden ITC/1522/2007, de 24 de mayo, por la que se establece la regulación de la garantía del origen de la electricidad procedente de fuentes de energía renovables y cogeneración de alta eficiencia.
- Corrección de errores de la Orden IET/1045/2014, de 16 de junio por la que se aprueban los parámetros retributivos de las instalaciones tipo aplicables a

determinadas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.

- Orden IET/1882/2014, de 14 de octubre por la que se establece la metodología para el cálculo de la energía eléctrica imputable a la utilización de combustibles en las instalaciones solares termoelectricas.
- Corrección de errores de la Orden IET/1045/2014, de 16 de junio por la que se aprueban los parámetros retributivos de las instalaciones tipo aplicables a determinadas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.
- Orden IET/1459/2014, de 1 de agosto por la que se aprueban los parámetros retributivos y se establece el mecanismo de asignación de régimen retributivo específico para nuevas instalaciones eólicas y fotovoltaicas en los sistemas eléctricos de los territorios no peninsulares.
- Orden IET/1168/2014, de 3 de julio por la que se determina la fecha de inscripción automática de determinadas instalaciones en el registro de régimen retributivo específico previsto en el Título V del Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.
- Orden IET/1045/2014, de 16 de junio por la que se aprueban los parámetros retributivos de las instalaciones tipo aplicables a determinadas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.

9.3. Medio ambiente

En cualquier proyecto, al igual que se ha hecho en el APARTADO 5 de este proyecto, en el que se generen o exista la posibilidad de generar cualquier tipo de partícula o elemento, y particularmente contaminantes, debe realizar una evaluación del impacto ambiental de dicho proyecto. Para ello, la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental establece las pautas para hacerlo.

10. Conclusiones

Tras haber realizado el diseño termodinámico de la planta, y a partir de los resultados medioambientales y económicos obtenidos, en este apartado se van a exponer las distintas conclusiones que se pueden extraer de este trabajo.

En primer lugar, cabe destacar que la geotermia, y aún más de la tecnología propuesta en este trabajo, se encuentra todavía en fases de desarrollo. Esto puede verse, por ejemplo, en el uso de la tecnología que se emplea en la industria petrolera y gasística para la realización de perforaciones subterráneas, en lugar de tener una tecnología propia más adecuada y propia la geotermia.

En la misma línea, en la actualidad no existe ninguna planta que emplee CO₂ supercrítico como fluido de trabajo, con lo que a pesar de los numerosos estudios que demuestran las enormes ventajas de este gas frente al actual uso de agua en los EGS, no se disponen de los datos experimentales que podrían obtenerse de la puesta en práctica de esta tecnología, de forma que pudiesen confirmarse o corregirse las suposiciones realizadas.

Se ha hecho referencia, también, a la gran importancia de las condiciones del yacimiento en los proyectos geotérmicos de alta temperatura y en los resultados de estos. Al contrario que la geotermia somera, que puede situarse casi en cualquier lugar del planeta, los yacimientos geotérmicos de alta temperatura son muy difíciles de encontrar, y mucho más si se pretende que su explotación sea viable económicamente. Como se ha podido comprobar se requieren grandes extensiones de terreno y altas profundidades para obtener valores de potencia y rendimiento elevados, con lo que, como ya se ha advertido en varias ocasiones, el gradiente geotérmico es un factor absolutamente fundamental y determinante en este tipo de proyectos.

En cuanto al factor socioeconómico, las energías renovables están ampliamente aceptadas por la sociedad y contribuyen a reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera. En el APARTADO 5 se ha podido comprobar como las emisiones de las centrales geotérmicas son prácticamente nulas, sobre todo en comparación con las centrales termoeléctricas convencionales. Además, la posibilidad de capturar el CO₂ de estas últimas bajo el subsuelo constituye ofrece un beneficio adicional para el medioambiente. Por si fuera poco, numerosos estudios han demostrado que las plantas de energía renovables generan muchos más puestos de trabajo que las tecnologías de generación convencionales, y estos puestos son, generalmente, estables, de larga duración, muy diversificados y de alta calidad. En la TABLA 24 puede verse una comparativa entre las ratios estimados de generación de empleo en EEUU para la geotermia y el gas natural. Como contrapartida, la sismicidad inducida localmente, que podría generar rechazo social, se ha demostrado que resulta inofensiva en la mayoría de los casos, ya que en los casos más extremos los terremotos inducidos apenas producen daños de carácter leve.

	Fase de construcción e instalación (trabajos/MW)	Fase de operación y mantenimiento (trabajos/MW)
Geotermia	4,0	1,7
Gas natural	1,0	0,1

Tabla 24: Ratios estimados de generación de empleo en EEUU para la geotermia y el gas natural. [40]

En el ámbito económico, como ocurre con la mayor parte de las tecnologías renovables, el coste de la electricidad generada es mayor que el de las tecnologías de generación convencionales. Esto hace que se vuelvan mucho menos competitivas en el mercado, y ha llevado a que se produzca un retraso considerable en el desarrollo y maduración que, hoy en día, todavía perdura. Por ello, y con la necesidad de conseguir la independencia de los combustibles fósiles, que acabarán por agotarse en los próximos años, las distintas instituciones y los gobiernos de las distintas naciones deberían promover e incentivar las tecnologías renovables, de forma que se pueda promover un impulso definitivo al sector.

11. Referencias

- [1] Plan Ceibal, «Cuando la naturaleza decide,» [En línea]. Disponible en: http://rea.ceibal.edu.uy/UserFiles/P0001/ODEA/ORIGINAL/0100208terremoto2.elp/estructura_interna_de_la_tierra.html. [Último acceso: 7 Enero 2017].
- [2] Instituto Geológico y Minero de España, «La energía geotérmica,» [En línea]. Disponible en: <http://www.igme.es/Geotermia/La%20energ%EDa%20geot%E9rmica.htm>. [Último acceso: 2017 Enero 7].
- [3] P. Turnero, «Monografias.com,» [En línea]. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos104/catastrofes-naturales/catastrofes-naturales.shtml>. [Último acceso: 7 Enero 2017].
- [4] Portal Huarpe, «Desastres naturales: Placas tectónicas,» [En línea]. Disponible en: <http://www.portalhuarpe.com.ar/medhime20/Talleres/Talleres%20Rawson/EPET3/02%20Desastres%20Naturales/Pagina/Placas%20tectonicas.html>. [Último acceso: 7 Enero 2017].
- [5] Tecnología y Recursos de la Tierra, S.A., «Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio Técnico PER 2011-2020,» 2011.
- [6] Tecnología y Recursos de la Tierra, S.A., «ANEXO 1. Tecnologías de aprovechamiento de los recursos geotérmicos,» de *Elaboración de los mapas y análisis de las posibilidades explotación y aprovechamiento del flujo de calor terrestre de Extremadura (España), Alentejo y región centro (Portugal) en el marco del proyecto PROMOEENER_A_4_E*, 2013.
- [7] G. Llopis Trillo y V. Rodrigo Angulo, «Guía de la Energía Geotérmica,» Madrid, 2008.
- [8] R. Bertani, «Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report,» *Geothermics*, vol. 60, pp. 31-43, Marzo 2016.
- [9] J. W. Lund y T. L. Boyd, «Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review,» *Geothermics*, vol. 60, pp. 66-93, Marzo 2016.
- [10] «Ciencia y Cemento,» 28 Mayo 2014. [En línea]. Disponible en: <http://wp.cienciaycemento.com/cimentacion-termoactiva/>. [Último acceso: 18 Enero 2017].
- [11] «Lumen Learning,» [En línea]. Disponible en: <https://courses.lumenlearning.com/cheminter/chapter/phase-diagram-for-water/>. [Último acceso: 23 Enero 2017].

- [12] A. Mazzoldi, D. Picard, P. G. Sriram y C. M. Oldenburg, «Simulation-based estimates of safety distances for pipeline transportation of carbon dioxide,» *Greenhouse Gases: Science and Technology*, Agosto 2013.
- [13] D. W. Brown, «A hot dry rock geothermal energy concept utilizing supercritical CO₂ instead of water,» de *Stanford Geothermal Workshop*, 2000.
- [14] A. Colmenar-Santos, M. Folch-Calvo, E. Rosales-Asensio y D. Borge-Diez, «The geothermal potential in Spain,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 865-886, Abril 2016.
- [15] C. R. Chamorro, J. L. García-Cuesta, M. E. Mondéjar y M. M. Linares, «An estimation of the enhanced geothermal systems potential for the Iberian Peninsula,» *Renewable Energy*, vol. 66, pp. 1-14, Junio 2014.
- [16] Instituto Geográfico Nacional (IGN), «España a través de los mapas,» [En línea]. Disponible en: https://www.ign.es/espmapi/mapas_clima_bach/Mapa_clima_09.htm. [Último acceso: 28 Enero 2017].
- [17] K. Pruess, «Enhanced geothermal systems (EGS) using CO₂ as working fluid - A novel approach for generating renewable energy with simultaneous sequestration of carbon,» *Geothermics*, vol. 35, pp. 351-367, 2006.
- [18] Wikipedia, «Ciclo Brayton,» [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_Brayton. [Último acceso: 30 Enero 2017].
- [19] G. Flores y K. Robles, «Ciclos de Potencia Mediante Gas,» 2 Marzo 2015. [En línea]. Disponible en: <http://ciclosdepotenciamediantegas.blogspot.com.es/>. [Último acceso: 31 Enero 2017].
- [20] M. J. Moran y H. N. Shapiro, *Fundamentos de termodinámica técnica*, Reverte, 2004.
- [21] J. Biagi, R. Agarwal y Z. Zhang, «Simulation and optimization of enhanced geothermal systems using CO₂ as a working fluid,» *Energy*, vol. 86, pp. 627-637, 15 Junio 2015.
- [22] K. Pruess, «On production behavior of enhanced geothermal systems with CO₂ as working fluid,» *Energy Conversion and Management*, vol. 49, pp. 1446-1454, 2008.
- [23] D. Chandra, C. Conrad, D. Hall, A. Weiner, N. Montebello, A. Narasimharaju, V. Rajput, E. Phelan y G. Izadi, *Supercritical Carbon Dioxide Circulated EGS Combined with IGCC in New Mexico. Optimizing geothermal energy production in arid regions*, 2011.
- [24] Wikipedia. La enciclopedia libre, «Esmog,» [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Esmog>. [Último acceso: 10 Febrero 2017].

- [25] Wikipedia. La enciclopedia libre, «Dióxido de carbono,» [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Di%C3%B3xido_de_carbono. [Último acceso: 10 Febrero 2017].
- [26] K. Pruess y N. Spycher, «Enhanced Geothermal Systems (EGS) with CO₂ as Heat Transmission Fluid - A Scheme for Combining Recovery of Renewable Energy with Geologic Storage of CO₂,» de *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, 2010.
- [27] E. L. Majer, R. Baria, M. Stark, S. Oates, J. Bommere, B. Smith y H. Asanumag, «Induced seismicity associated with Enhanced Geothermal Systems,» *Geothermics*, vol. 36, pp. 185-222, 2007.
- [28] P. Olasolo, M. Juárez, J. Olasolo, M. Morales y D. Valdani, «Economic analysis of Enhanced Geothermal Systems (EGS). A review of software packages for estimating and simulating costs,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 104, pp. 647-658, 5 Julio 2016.
- [29] P. Heidinger, «Integral modeling and financial impact of the geothermal situation and power plant at Soultz-sous-Forêts,» *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 342, pp. 626-635, 2010.
- [30] M. Gehringer y V. Loksha, «Manual de geotermia: como planificar y financiar la generación de electricidad,» 2012.
- [31] V. Stefansson, «Investment cost for geothermal power plants,» de *Proceeding of the 5th Inaga annual scientific conference & exhibitions*, Yogyakarta, 2001.
- [32] J. R. Estévez Sala, «Feasibility study: Cost estimation for geothermal development,» de *Short Course VI on Utilization of Low- and Medium-Enthalpy Geothermal Resources and Financial Aspects of Utilization*, Santa Tecla, 2014.
- [33] J. W. Lund, «The USA geothermal country update,» *Geothermics*, vol. 32, pp. 409-418, 2003.
- [34] G. Mines, C. Richard, J. Nathwani, H. Hanson y R. Wood, «Geothermal Plant Capacity Factors,» de *Proceedings, Fortieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, 2015.
- [35] E. S. Rubin, J. E. Davison y H. J. Herzog, «The cost of CO₂ capture and storage,» *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 40, pp. 378-400, Septiembre 2015.
- [36] IRENA, «International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable Energy Costs, Technologies and Markets,» [En línea]. Disponible en: <http://costing.irena.org/media/5905/simplified-oecd-and-nonoecd-lcoe.jpg>. [Último acceso: 20 Marzo 2017].

- [37] Operador del Mercado Ibérico de Energía (OMIE), «Precio final anual de la demanda nacional,» [En línea]. Disponible en: <http://www.omie.es/files/flash/ResultadosMercado.swf>. [Último acceso: 9 Abril 2017].
- [38] S. Barnes, «Using Pinch Analysis to Optimize the Heat Exchanger Network of a Regenerative Rankine Cycle for an Existing Modern Nuclear Power Plant,» 2013.
- [39] Gobierno de España. Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital. Secretaría de Estado de Energía, «Energía eléctrica. Energías renovables, cogeneración y residuos,» [En línea]. Disponible en: <http://www.minetad.gob.es/energia/electricidad/energias-renovables/Paginas/renovables.aspx>. [Último acceso: 20 Julio 2017].
- [40] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) | Instituto Geológico y Minero de España (IGME), «Manual de Geotermia,» Madrid, 2008.



Anexo I: Cálculo del ciclo termodinámico, el refrigerador y la torre de refrigeración del ciclo Brayton simple

Ciclo Brayton Simple. Periodo 1

Ciclo termodinámico

Datos del yacimiento:

$$z_s := 5000 \cdot \text{m}$$

$$e_{yac} := 305 \cdot \text{m}$$

$$p_{yac} := 200 \cdot \text{bar}$$

$$q_M := 32 \cdot \frac{\text{mW}}{\text{m}^2}$$

$$q_0 := 108.2 \cdot \frac{\text{mW}}{\text{m}^2}$$

$$e_{rad} := 13 \cdot \text{km}$$

$$k := 2.5 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Datos del aire ambiente:

$$T_{amb_m\acute{a}x} := (15 + 273.15) \cdot \text{K} = 288.15 \text{ K}$$

$$T_{amb_m\acute{i}n} := (10 + 273.15) \cdot \text{K} = 283.15 \text{ K}$$

$$HR_{m\acute{i}n} := 70\%$$

$$HR_{m\acute{a}x} := 75\%$$

$$p_{atm} := 1 \cdot \text{atm}$$

Datos del fluido de trabajo:

$$m_{CO2} := 1088 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\gamma_t := 1.302 \quad \gamma_c := 1.041$$

$$T_{crit} := \text{PropsSI}("T_{crit}", "T", 273, "P", 1, "CO2") \cdot \text{K} = 304.128 \text{ K}$$

$$P_{crit} := \text{PropsSI}("P_{crit}", "T", 273, "P", 1, "CO2") \cdot \text{Pa} = 7.377 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Otros datos correspondientes al ciclo termodinámico:

$$p_{ref} := 75 \cdot \text{bar} \quad \text{Rango} := 15 \cdot \text{K} \quad \eta_{p_c} := 90\% \quad \eta_{m_c} := 99.8\%$$

$$\text{Aprox} := 3 \cdot \text{K} \quad \eta_{em_gen} := 98\% \quad \eta_{p_t} := 90\% \quad \eta_{m_t} := 99.8\%$$

$$\text{Pinch}_t := 3 \cdot \text{K}$$

Cálculo de las condiciones ambientales medias y de la temperatura del yacimiento:

$$T_{amb_m} := \frac{T_{amb_m\acute{a}x} + T_{amb_m\acute{i}n}}{2} = 285.65 \text{ K}$$

$$HR_m := \frac{HR_{m\acute{i}n} + HR_{m\acute{a}x}}{2} = 0.725$$

$$T_{amb_m_wb} := \text{HAPropsSI}\left("T_{wb}", "T", \frac{T_{amb_m}}{\text{K}}, "P", \frac{p_{atm}}{\text{Pa}}, "RH", HR_m\right) \cdot \text{K} = 283.055 \text{ K}$$

$$q_v := \frac{q_0 - q_M}{e_{rad}} = 5.862 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \quad z_m := z_s + \frac{e_{yac}}{2} = 5.152 \times 10^3 \text{ m}$$

$$T_{\text{prod}} := T_{\text{amb_m}} + \frac{q_0}{k} \cdot z_m - \frac{q_v}{2 \cdot k} \cdot z_m^2 = 477.527 \text{ K}$$

Cálculo de las temperaturas de los distintos puntos del ciclo termodinámico:

$$T_{\text{st}} := T_{\text{prod}} \cdot \left(\frac{P_{\text{ref}}}{P_{\text{yac}}} \right)^{\frac{(\gamma_t - 1) \cdot \eta_{p_t}}{\gamma_t}} = 389.112 \text{ K}$$

$$T_{\text{ec}} := T_{\text{amb_m_wb}} + \text{Aprox} + \text{Pinch}_T = 289.055 \text{ K}$$

$$T_{\text{iny}} := T_{\text{ec}} \cdot \left(\frac{P_{\text{yac}}}{P_{\text{ref}}} \right)^{\frac{\gamma_c - 1}{\gamma_c \cdot \eta_{p_c}}} = 301.732 \text{ K}$$

Cálculo de los valores de entalpía específica en los distintos puntos del ciclo termodinámico:

$$h_{\text{ec}} := \text{PropsSI} \left("H", "T", \frac{T_{\text{ec}}}{\text{K}}, "P", \frac{P_{\text{ref}}}{\text{Pa}}, "CO2" \right) \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 2.363 \times 10^5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$h_{\text{iny}} := \text{PropsSI} \left("H", "T", \frac{T_{\text{iny}}}{\text{K}}, "P", \frac{P_{\text{yac}}}{\text{Pa}}, "CO2" \right) \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 2.52 \times 10^5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$h_{\text{prod}} := \text{PropsSI} \left("H", "T", \frac{T_{\text{prod}}}{\text{K}}, "P", \frac{P_{\text{yac}}}{\text{Pa}}, "CO2" \right) \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 6.038 \times 10^5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$h_{\text{st}} := \text{PropsSI} \left("H", "T", \frac{T_{\text{st}}}{\text{K}}, "P", \frac{P_{\text{ref}}}{\text{Pa}}, "CO2" \right) \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 5.438 \times 10^5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Balance de energía:

$$Q_{\text{abs}} := m_{\text{CO2}} (h_{\text{prod}} - h_{\text{iny}}) = 3.828 \times 10^8 \text{ W}$$

$$Q_{\text{ref}} := m_{\text{CO2}} (h_{\text{st}} - h_{\text{ec}}) = 3.346 \times 10^8 \text{ W}$$

$$W_t := m_{\text{CO2}} (h_{\text{prod}} - h_{\text{st}}) \cdot \eta_{m_t} = 6.516 \times 10^7 \text{ W}$$

$$W_c := \frac{m_{\text{CO2}} (h_{\text{iny}} - h_{\text{ec}})}{\eta_{m_c}} = 1.71 \times 10^7 \text{ W}$$

Cálculo del consumo de agua de la torre de refrigeración:

$$Q_{\text{torre}} := Q_{\text{ref}}$$

$$T_{wf} := T_{amb_m_wb} + Aprox = 286.055 \text{ K}$$

$$T_{wc} := T_{wf} + Rango = 301.055 \text{ K}$$

$$h_{wf} := PropsSI\left("H", "T", \frac{T_{wf}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "Water"\right) \cdot \frac{J}{kg} = 5.43 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{wc} := PropsSI\left("H", "T", \frac{T_{wc}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "Water"\right) \cdot \frac{J}{kg} = 1.171 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$m_w := \frac{Q_{torre}}{h_{wc} - h_{wf}} = 5.331 \times 10^3 \frac{kg}{s}$$

Cálculo del rendimiento de la central:

$$W_b := 5.169 \times 10^5 \text{ W} \quad (\text{Del cálculo del refrigerador})$$

$$W_{gen} := (W_t - W_c) \cdot \eta_{em_gen} - W_b = 4.659 \times 10^7 \text{ W}$$

$$\eta := \frac{W_{gen}}{Q_{abs}} = 0.122$$

Refrigerador

Datos:

$$P_{\text{ref}} := 75 \cdot \text{bar}$$

$$T_{\text{amb_máx}} := (15 + 273.15) \cdot \text{K} = 288.15 \text{ K}$$

$$P_{\text{atm}} := 1 \cdot \text{atm}$$

$$T_{\text{amb_mín}} := (10 + 273.15) \cdot \text{K} = 283.15 \text{ K}$$

$$\text{Aprox} := 3 \cdot \text{K}$$

$$\text{HR}_{\text{mín}} := 70. \%$$

$$\text{Rango} := 15 \cdot \text{K}$$

$$\text{HR}_{\text{máx}} := 75. \%$$

$$m_{\text{w}} := 5331 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$T_{\text{ec}} := 289.055 \text{ K}$$

$$T_{\text{st}} := 389.112 \text{ K}$$

$$n_{\text{pt}} := 2$$

$$\eta_{\text{b}} := 90. \%$$

$$v := 3 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$D_{\text{e}} := 24 \cdot \text{mm}$$

Galga 25

$$R_{\text{ens}} := 2.4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

Material de los tubos: Cuproniquel 70-30

Cálculo de las condiciones ambientales medias:

$$T_{\text{amb_m}} := \frac{T_{\text{amb_máx}} + T_{\text{amb_mín}}}{2} = 285.65 \text{ K}$$

$$\text{HR}_{\text{m}} := \frac{\text{HR}_{\text{mín}} + \text{HR}_{\text{máx}}}{2} = 0.725$$

$$T_{\text{amb_m_wb}} := \text{HAPropsSI} \left("T_{\text{wb}}", "T", \frac{T_{\text{amb_m}}}{\text{K}}, "P", \frac{P_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, "RH", \text{HR}_{\text{m}} \right) \cdot \text{K} = 283.055 \text{ K}$$

Cálculo de las dimensiones del refrigerador:

En primer lugar, es necesario obtener el valor del coeficiente global de transferencia de calor. Para obtener este valor, se va a hacer uso de la norma del HEI para el cálculo de refrigeradores de superficie para plantas de producción de potencia.

$$e_{\text{galga}} := 0.508 \cdot \text{mm}$$

$$T_{\text{wf}} := T_{\text{amb_m_wb}} + \text{Aprox} = 286.055 \text{ K}$$

$$D_i := D_e - 2 \cdot e_{\text{galga}} = 0.023 \text{ m}$$

$$T_{\text{wc}} := T_{\text{wf}} + \text{Rango} = 301.055 \text{ K}$$

$$F_m := 0.97$$

$$U_{\text{cl}} := 2.7 \cdot \left(\frac{v}{\frac{m}{s}} \right)^{0.5} \cdot \left[0.5707 + 0.0274 \cdot \frac{T_{\text{wf}} - 273.15 \cdot \text{K}}{\text{K}} - 0.00036 \cdot \left(\frac{T_{\text{wf}} - 273.15 \cdot \text{K}}{\text{K}} \right)^2 \right] \cdot F_m \cdot \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$U_{\text{cl}} = 3.921 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{K} \cdot \text{s}^3}$$

$$U := \left(\frac{D_e}{D_i} \cdot R_{\text{ens}} + \frac{1}{U_{\text{cl}}} \right)^{-1} = 1.978 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{K} \cdot \text{s}^3}$$

Una vez calculado el coeficiente global de transferencia de calor, se calculan las dimensiones del intercambiador a través de la definición de calor transferido:

$$\Delta T_{\text{lm}} := \frac{(T_{\text{ec}} - T_{\text{wf}}) - (T_{\text{st}} - T_{\text{wc}})}{\ln \left(\frac{T_{\text{ec}} - T_{\text{wf}}}{T_{\text{st}} - T_{\text{wc}}} \right)} = 25.17 \text{ K}$$

$$h_{\text{wf}} := \text{PropsSI} \left("H", "T", \frac{T_{\text{wf}}}{\text{K}}, "P", \frac{P_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, "Water" \right) \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 5.43 \times 10^4 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$h_{\text{wc}} := \text{PropsSI} \left("H", "T", \frac{T_{\text{wc}}}{\text{K}}, "P", \frac{P_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, "Water" \right) \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 1.171 \times 10^5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$Q_{\text{ref}} := m_w \cdot (h_{\text{wc}} - h_{\text{wf}}) = 3.346 \times 10^8 \text{ W}$$

$$A_T := \frac{Q_{\text{ref}}}{U \cdot \Delta T_{\text{lm}}} = 6.722 \times 10^3 \text{ m}^2$$

$$T_f := \frac{T_{\text{wc}} + T_{\text{wf}}}{2} = 293.555 \text{ K}$$

$$\rho_w := \text{PropsSI} \left("D", "T", \frac{T_f}{\text{K}}, "P", \frac{P_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, "Water" \right) \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 998.123 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$N_t := \frac{m_w}{\rho_w \cdot v \cdot \pi \cdot \frac{D_i^2}{4}} = 4.291 \times 10^3$$

$$L_c := \frac{A_T}{\pi \cdot D_e \cdot N_t \cdot n_{pt}} = 10.389 \text{ m}$$

$$L_t := n_{pt} \cdot L_c = 20.777 \text{ m}$$

Cálculo de la pérdida de carga del agua en el refrigerador:

$$\mu_w := \text{PropsSI}\left("V", "T", \frac{T_f}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "Water"\right) \cdot (\text{Pa} \cdot \text{s}) = 9.917 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}}$$

$$\text{Re}_w := \frac{\rho_w \cdot v \cdot D_i}{\mu_w} = 6.94 \times 10^4$$

$$f := 4 \cdot \left(1.58 \cdot \ln(\text{Re}_w) - 3.28\right)^{-2} = 0.019$$

$$\Delta p_w := \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot v^2 \cdot \left(1.5 + f \cdot \frac{L_t + 15 \cdot D_i}{D_i}\right) = 8.71 \times 10^4 \text{ Pa} \quad \frac{\Delta p_w}{\rho_w \cdot g} = 8.899 \text{ m}$$

$$W_b := \frac{\Delta p_w \cdot \frac{m_w}{\rho_w}}{\eta_b} = 5.169 \times 10^5 \text{ W}$$

Torre de refrigeración

Datos:

$$p_{\text{atm}} := 1 \cdot \text{atm}$$

$$T_{\text{amb_máx}} := (15 + 273.15) \cdot \text{K} = 288.15 \text{ K}$$

$$\text{Aprox} := 3 \cdot \text{K}$$

$$T_{\text{amb_mín}} := (10 + 273.15) \cdot \text{K} = 283.15 \text{ K}$$

$$\text{Rango} := 15 \cdot \text{K}$$

$$\text{HR}_{\text{mín}} := 70\%$$

$$m_{\text{w}} := 5331 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\text{HR}_{\text{máx}} := 75\%$$

$$\Delta T_{\text{wb}} := 15 \cdot \text{K}$$

$$\text{Empaquetamiento: } a_{\text{d}} := 0.56 \quad b_{\text{d}} := 0.58 \quad a_{\text{p}} := 1.74 \quad b_{\text{p}} := 12.4$$

Cálculo de las condiciones ambientales medias:

$$T_{\text{amb_m}} := \frac{T_{\text{amb_máx}} + T_{\text{amb_mín}}}{2} = 285.65 \text{ K}$$

$$\text{HR}_{\text{m}} := \frac{\text{HR}_{\text{mín}} + \text{HR}_{\text{máx}}}{2} = 0.725$$

$$T_{\text{amb_m_wb}} := \text{HAPropsSI}\left("T_{\text{wb}}", "T", \frac{T_{\text{amb_m}}}{\text{K}}, "P", \frac{p_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, "RH", \text{HR}_{\text{m}}\right) \cdot \text{K} = 283.055 \text{ K}$$

Cálculo de las dimensiones de la torre:

$$T_{wf} := T_{amb_m_wb} + Aprox = 286.055 \text{ K}$$

$$T_{wc} := T_{wf} + Rango = 301.055 \text{ K}$$

$$i_{wf} := PropsSI\left("H", "T", \frac{T_{wf}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "Water"\right) \cdot \frac{J}{kg} = 5.43 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$i_{wc} := PropsSI\left("H", "T", \frac{T_{wc}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "Water"\right) \cdot \frac{J}{kg} = 1.171 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$Q_{torre} := m_w \cdot (i_{wc} - i_{wf}) = 3.346 \times 10^8 \text{ W}$$

$$G_w := 1.4771 \cdot \frac{kg}{s \cdot m^2}$$

$$D := \sqrt{\frac{4 \cdot m_w}{\pi \cdot G_w}} = 67.788 \text{ m} \quad \text{Diámetro de la base de la torre}$$

$$z := 1.34 \cdot D = 90.836 \text{ m} \quad \text{Altura de la torre}$$

$$d := 0.62 \cdot D = 42.029 \text{ m} \quad \text{Diámetro de la zona más estrecha de la torre}$$

$$b := 0.12 \cdot D = 8.135 \text{ m} \quad \text{Altura de los soportes de la torre}$$

$$i_{ae} := \text{HAPropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{amb_m}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "B", \frac{T_{amb_m_wb}}{K}\right) \cdot \frac{J}{kg} = 2.909 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$T_{as} := T_{amb_m_wb} + \Delta T_{wb} = 298.055 \text{ K}$$

$$i_{as} := \text{HAPropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{as}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "R", 1\right) \cdot \frac{J}{kg} = 7.611 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$m_a := \frac{Q_{torre}}{i_{as} - i_{ae}} = 7.117 \times 10^3 \frac{kg}{s}$$

$$G_a := \frac{m_a}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}} = 1.972 \frac{kg}{s \cdot m^2}$$

$$\frac{G_w}{G_a} = 0.749$$

Para calcular la longitud del empaquetamiento, se clacula el valor de la integral de Merkel con el método ε -NTU:

$$i_{swc} := \text{HAPropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{wc}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "R", 1\right) \cdot \frac{J}{kg} = 8.953 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$i_{swf} := \text{HAPropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{wf}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "R", 1\right) \cdot \frac{J}{kg} = 3.648 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$T_{wm} := \frac{T_{wc} + T_{wf}}{2} = 293.555 \text{ K}$$

$$i_{swm} := \text{HAPropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{wm}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "R", 1\right) \cdot \frac{J}{kg} = 5.895 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$c_{pw} := \text{PropsSI}\left("C", "T", \frac{T_{wm}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "Water"\right) \cdot \frac{J}{kg \cdot K} = 4.184 \times 10^3 \frac{m^2}{K \cdot s^2}$$

$$C_t := \frac{m_w \cdot c_{pw}}{m_a \cdot \frac{i_{swc} - i_{swf}}{T_{wc} - T_{wf}}} = 0.886$$

$$\lambda := \frac{i_{swc} + i_{swf} - 2 \cdot i_{swm}}{4} = 2.027 \times 10^3 \frac{m^2}{s^2}$$

$$\epsilon_i := \frac{i_{swc} - i_{swf}}{i_{swc} - i_{ae} - \lambda} = 0.908$$

$$NTU_{min} := \frac{-\ln\left(\frac{1 - \epsilon_i}{1 - C_t}\right)}{1 - C_t} = 1.878$$

$$IM := NTU_{min} \cdot \frac{c_{pw}}{\frac{i_{swc} - i_{swf}}{T_{wc} - T_{wf}}} = 2.222$$

$$PF := a_d \cdot \left(\frac{G_w}{G_a}\right)^{-b_d} \cdot \frac{1}{m} = 0.662 \frac{1}{m}$$

$$L_{fi} := \frac{IM}{PF} = 3.355 \text{ m}$$

Por último, se calcula la pérdida de carga a lo largo de la torre, que tiene que ser igual a la suma de la pérdida de carga en el empaquetamiento y la pérdida de carga a la salida de la torre:

$$\omega_{ae} := \text{HAPropsSI}\left("W", "T", \frac{T_{amb_m}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "B", \frac{T_{amb_m_wb}}{K}\right) = 6.546 \times 10^{-3}$$

$$\omega_{as} := \text{HAPropsSI}\left("W", "T", \frac{T_{as}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "R", 1\right) = 0.02$$

$$\xi := \frac{T_{as} - T_{amb_m}}{z} = 0.137 \frac{K}{m}$$

$$\Delta P_t := P_{atm} \cdot \left[\left(1 - 0.00975 \cdot \frac{K}{m} \cdot \frac{1 + \omega_{ae}}{1 + 1.9 \cdot \omega_{ae}} \cdot \frac{b + \frac{L_{fi}}{2}}{T_{amb_m}} \right)^{\frac{2.1778 \cdot (1 + 1.9 \cdot \omega_{ae})}{\omega_{ae} + 0.622}} \cdot \left[1 - \xi \cdot \frac{z - \left(b + \frac{L_{fi}}{2} \right)}{T_{as}} \right]^{\frac{0.021233 \cdot (1 + \omega_{as})}{\xi \cdot (\omega_{as} + 0.622) \cdot \frac{m}{K}}} \right] - \left(1 - 0.00975 \cdot \frac{K}{m} \cdot \frac{1 + \omega_{ae}}{1 + 1.9 \cdot \omega_{ae}} \cdot \frac{z}{T_{amb_m}} \right)^{\frac{2.1778 \cdot (1 + 1.9 \cdot \omega_{ae})}{\omega_{ae} + 0.622}} \right] = 31.744 \text{ Pa}$$

$$v_{ae} := \text{HAPropsSI}\left("V", "T", \frac{T_{amb_m}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "B", \frac{T_{amb_m_wb}}{K}\right) \cdot \frac{m^3}{kg} = 0.817 \frac{m^3}{kg}$$

$$\rho_{ae} := \frac{1}{v_{ae}} = 1.223 \frac{kg}{m^3}$$

$$v_{as} := \text{HAPropsSI}\left("V", "T", \frac{T_{as}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "R", 1\right) \cdot \frac{m^3}{kg} = 0.871 \frac{m^3}{kg} \quad \rho_{as} := \frac{1}{v_{as}} = 1.148 \frac{kg}{m^3}$$

$$v_m := \frac{v_{ae} + v_{as}}{2} = 0.844 \frac{m^3}{kg} \quad \rho_m := \frac{1}{v_m} = 1.184 \frac{kg}{m^3}$$

$$K_{fill} := a_p \cdot \frac{G_w}{G_a} + b_p = 13.703$$

$$v_z := \text{HAPropsSI}\left("V", "T", \frac{T_{amb_m}}{K}, "P", \frac{P_{atm} - \frac{g \cdot z}{v_{ae}}}{Pa}, "B", \frac{T_{amb_m_wb}}{K}\right) \cdot \frac{m^3}{kg} = 0.826 \frac{m^3}{kg}$$

$$\rho_z := \frac{1}{v_z} = 1.21 \frac{kg}{m^3} \quad Fr_D := \frac{\left[\frac{m_a \cdot (1 + \omega_{as})}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}} \right]^2}{\rho_{as} \cdot (\rho_z - \rho_{as}) \cdot g \cdot d} = 0.929$$

$$K_{to} := \frac{-0.28}{Fr_D} + \frac{0.04}{Fr_D^{1.5}} = -0.257$$

$$\Delta p := K_{fill} \left[G_a \cdot \left(1 + \frac{\omega_{ae} + \omega_{as}}{2} \right) \right]^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot \rho_m} \left[1 - \xi \cdot \frac{z - \left(b + \frac{L_{fi}}{2} \right)}{T_{as}} \right] + \frac{0.021233 \cdot (1 + \omega_{as})}{\xi \cdot (\omega_{as} + 0.622)} \cdot \frac{m}{K} + (1 + K_{to}) \cdot \left[\frac{m_a \cdot (1 + \omega_{as})}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}} \right]^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot \rho_{as}} = 31.744 \text{ Pa}$$

Ciclo Brayton Simple. Periodo 2

Ciclo termodinámico

Datos del yacimiento:

$$p_{yac} := 200 \cdot \text{bar}$$

Datos del aire ambiente:

$$T_{amb_m\acute{a}x} := (15 + 273.15) \cdot K = 288.15 K$$

$$T_{amb_m\acute{i}n} := (10 + 273.15) \cdot K = 283.15 K$$

$$HR_{m\acute{i}n} := 70. \%$$

$$HR_{m\acute{a}x} := 75. \%$$

$$p_{atm} := 1 \cdot \text{atm}$$

Datos del fluido de trabajo:

$$m_{CO_2} := 1160 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\gamma_t := 1.322 \quad \gamma_c := 1.041$$

$$T_{crit} := \text{PropsSI}("T_{crit}", "T", 273, "P", 1, "CO_2") \cdot K = 304.128 K$$

$$P_{crit} := \text{PropsSI}("P_{crit}", "T", 273, "P", 1, "CO_2") \cdot \text{Pa} = 7.377 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Otros datos correspondientes al ciclo termodinámico:

$$p_{ref} := 75 \cdot \text{bar} \quad \text{Rango} := 15 \cdot K \quad \eta_{p_c} := 90. \% \quad \eta_{m_c} := 99.8. \%$$

$$\text{Aprox} := 3 \cdot K \quad \eta_{em_gen} := 98. \% \quad \eta_{p_t} := 90. \% \quad \eta_{m_t} := 99.8. \%$$

$$\text{Pinch}_t := 3 \cdot K$$

Cálculo de las condiciones ambientales medias:

$$T_{amb_m} := \frac{T_{amb_m\acute{a}x} + T_{amb_m\acute{i}n}}{2} = 285.65 K$$

$$HR_m := \frac{HR_{m\acute{i}n} + HR_{m\acute{a}x}}{2} = 0.725$$

$$T_{amb_m_wb} := \text{HAPropsSI}\left("T_{wb}", "T", \frac{T_{amb_m}}{K}, "P", \frac{p_{atm}}{\text{Pa}}, "RH", HR_m\right) \cdot K = 283.055 K$$

Cálculo de las temperaturas de los distintos puntos del ciclo termodinámico:

$$T_{prod} := (152.2 + 273.15) \cdot K = 425.35 K$$

$$T_{st} := T_{prod} \cdot \left(\frac{P_{ref}}{P_{yac}} \right)^{\frac{(\gamma_t - 1) \cdot \eta_{p_t}}{\gamma_t}} = 343.059 \text{ K}$$

$$T_{ec} := T_{amb_m_wb} + Aprox + Pinch_T = 289.055 \text{ K}$$

$$T_{iny} := T_{ec} \cdot \left(\frac{P_{yac}}{P_{ref}} \right)^{\frac{\gamma_c - 1}{\gamma_c \cdot \eta_{p_c}}} = 301.732 \text{ K}$$

Cálculo de los valores de entalpía específica en los distintos puntos del ciclo termodinámico:

$$h_{ec} := PropsSI\left("H", "T", \frac{T_{ec}}{K}, "P", \frac{P_{ref}}{Pa}, "CO2"\right) \cdot \frac{J}{kg} = 2.363 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{iny} := PropsSI\left("H", "T", \frac{T_{iny}}{K}, "P", \frac{P_{yac}}{Pa}, "CO2"\right) \cdot \frac{J}{kg} = 2.52 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{prod} := PropsSI\left("H", "T", \frac{T_{prod}}{K}, "P", \frac{P_{yac}}{Pa}, "CO2"\right) \cdot \frac{J}{kg} = 5.268 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{st} := PropsSI\left("H", "T", \frac{T_{st}}{K}, "P", \frac{P_{ref}}{Pa}, "CO2"\right) \cdot \frac{J}{kg} = 4.814 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

Balance de energía:

$$Q_{abs} := m_{CO2} \cdot (h_{prod} - h_{iny}) = 3.188 \times 10^8 \text{ W}$$

$$Q_{ref} := m_{CO2} \cdot (h_{st} - h_{ec}) = 2.844 \times 10^8 \text{ W}$$

$$W_t := m_{CO2} \cdot (h_{prod} - h_{st}) \cdot \eta_{m_t} = 5.25 \times 10^7 \text{ W}$$

$$W_c := \frac{m_{CO2} \cdot (h_{iny} - h_{ec})}{\eta_{m_c}} = 1.823 \times 10^7 \text{ W}$$

Cálculo del consumo de agua de la torre de refrigeración:

$$Q_{torre} := Q_{ref}$$

$$T_{wf} := T_{amb_m_wb} + Aprox = 286.055 \text{ K}$$

$$T_{wc} := T_{wf} + Rango = 301.055 \text{ K}$$

$$h_{wf} := PropsSI\left("H", "T", \frac{T_{wf}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "Water"\right) \cdot \frac{J}{kg} = 5.43 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{wc} := \text{PropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{wc}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "Water"\right) \cdot \frac{J}{kg} = 1.171 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$m_w := \frac{Q_{torre}}{h_{wc} - h_{wf}} = 4.531 \times 10^3 \frac{kg}{s}$$

Cálculo del rendimiento de la central:

$$W_b := 7.197 \times 10^5 \text{ W} \quad (\text{Del cálculo del refrigerador})$$

$$W_{gen} := (W_t - W_c) \cdot \eta_{em_gen} - W_b = 3.287 \times 10^7 \text{ W}$$

$$\eta := \frac{W_{gen}}{Q_{abs}} = 0.103$$

Refrigerador

Datos:

$$P_{\text{ref}} := 75 \cdot \text{bar}$$

$$T_{\text{amb_máx}} := (15 + 273.15) \cdot \text{K} = 288.15 \text{ K}$$

$$P_{\text{atm}} := 1 \cdot \text{atm}$$

$$T_{\text{amb_mín}} := (10 + 273.15) \cdot \text{K} = 283.15 \text{ K}$$

$$\text{Aprox} := 3 \cdot \text{K}$$

$$\text{HR}_{\text{mín}} := 70\%$$

$$\text{Rango} := 15 \cdot \text{K}$$

$$\text{HR}_{\text{máx}} := 75\%$$

$$m_w := 4531 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$T_{\text{ec}} := 289.055 \text{ K}$$

$$T_{\text{st}} := 343.059 \text{ K}$$

$$n_{\text{pt}} := 2$$

$$\eta_b := 90\%$$

$$v := 3 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$D_e := 24 \cdot \text{mm}$$

Galga 25

$$R_{\text{ens}} := 2.4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

Material de los tubos: Cuproniquel 70-30

Cálculo de las condiciones ambientales medias:

$$T_{\text{amb_m}} := \frac{T_{\text{amb_máx}} + T_{\text{amb_mín}}}{2} = 285.65 \text{ K}$$

$$\text{HR}_m := \frac{\text{HR}_{\text{mín}} + \text{HR}_{\text{máx}}}{2} = 0.725$$

$$T_{\text{amb_m_wb}} := \text{HAPropsSI}\left("T_{\text{wb}}", "T", \frac{T_{\text{amb_m}}}{\text{K}}, "P", \frac{P_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, "RH", \text{HR}_m\right) \cdot \text{K} = 283.055 \text{ K}$$

Cálculo de las dimensiones del refrigerador:

En primer lugar, es necesario obtener el valor del coeficiente global de transferencia de calor. Para obtener este valor, haremos uso de la norma del HEI para el cálculo de refrigeradores de superficie para plantas de producción de potencia.

$$e_{\text{galga}} := 0.508 \cdot \text{mm}$$

$$T_{\text{wf}} := T_{\text{amb_m_wb}} + \text{Aprox} = 286.055 \text{ K}$$

$$D_i := D_e - 2 \cdot e_{\text{galga}} = 0.023 \text{ m}$$

$$T_{wc} := T_{wf} + \text{Rango} = 301.055 \text{ K}$$

$$F_m := 0.97$$

$$U_{cl} := 2.7 \cdot \left(\frac{v}{\frac{m}{s}} \right)^{0.5} \cdot \left[0.5707 + 0.0274 \cdot \frac{T_{wf} - 273.15 \cdot K}{K} - 0.00036 \cdot \left(\frac{T_{wf} - 273.15 \cdot K}{K} \right)^2 \right] \cdot F_m \cdot \frac{kW}{m^2 \cdot K}$$

$$U_{cl} = 3.921 \times 10^3 \frac{kg}{K \cdot s^3}$$

$$U := \left(\frac{D_e}{D_i} \cdot R_{ens} + \frac{1}{U_{cl}} \right)^{-1} = 1.978 \times 10^3 \frac{kg}{K \cdot s^3}$$

Una vez calculado el coeficiente global de transferencia de calor, calculamos las dimensiones del intercambiador a través de la definición de calor transferido:

$$\Delta T_{lm} := \frac{(T_{ec} - T_{wf}) - (T_{st} - T_{wc})}{\ln \left(\frac{T_{ec} - T_{wf}}{T_{st} - T_{wc}} \right)} = 14.779 \text{ K}$$

$$h_{wf} := \text{PropsSI} \left("H", "T", \frac{T_{wf}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "Water" \right) \cdot \frac{J}{kg} = 5.43 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{wc} := \text{PropsSI} \left("H", "T", \frac{T_{wc}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "Water" \right) \cdot \frac{J}{kg} = 1.171 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$Q_{ref} := m_w \cdot (h_{wc} - h_{wf}) = 2.844 \times 10^8 \text{ W}$$

$$A_T := \frac{Q_{ref}}{U \cdot \Delta T_{lm}} = 9.73 \times 10^3 \text{ m}^2$$

$$T_f := \frac{T_{wc} + T_{wf}}{2} = 293.555 \text{ K}$$

$$\rho_w := \text{PropsSI} \left("D", "T", \frac{T_f}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "Water" \right) \cdot \frac{kg}{m^3} = 998.123 \frac{kg}{m^3}$$

$$N_t := \frac{m_w}{\rho_w \cdot v \cdot \pi \cdot \frac{D_i^2}{4}} = 3.647 \times 10^3$$

$$L_c := \frac{A_T}{\pi \cdot D_e \cdot N_t \cdot n_{pt}} = 17.692 \text{ m}$$

$$L_t := n_{pt} \cdot L_c = 35.385 \text{ m}$$

Cálculo de la pérdida de carga del agua en el refrigerador:

$$\mu_w := \text{PropsSI}\left("V", "T", \frac{T_f}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "Water"\right) \cdot (\text{Pa} \cdot \text{s}) = 9.917 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}}$$

$$\text{Re}_w := \frac{\rho_w \cdot v \cdot D_i}{\mu_w} = 6.94 \times 10^4$$

$$f := 4 \cdot \left(1.58 \cdot \ln(\text{Re}_w) - 3.28\right)^{-2} = 0.019$$

$$\Delta p_w := \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot v^2 \cdot \left(1.5 + f \cdot \frac{L_t + 15 \cdot D_i}{D_i}\right) = 1.427 \times 10^5 \text{ Pa} \quad \frac{\Delta p_w}{\rho_w \cdot g} = 14.577 \text{ m}$$

$$W_b := \frac{\Delta p_w \cdot \frac{m_w}{\rho_w}}{\eta_b} = 7.197 \times 10^5 \text{ W}$$

Torre de refrigeración

Datos:

$$P_{\text{atm}} := 1 \cdot \text{atm}$$

$$T_{\text{amb_máx}} := (15 + 273.15) \cdot \text{K} = 288.15 \text{ K}$$

$$\text{Aprox} := 3 \cdot \text{K}$$

$$T_{\text{amb_mín}} := (10 + 273.15) \cdot \text{K} = 283.15 \text{ K}$$

$$\text{Rango} := 15 \cdot \text{K}$$

$$\text{HR}_{\text{mín}} := 70\%$$

$$m_w := 4531 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\text{HR}_{\text{máx}} := 75\%$$

$$\Delta T_{\text{wb}} := 15 \cdot \text{K}$$

$$\text{Empaquetamiento: } a_d := 0.56 \quad b_d := 0.58 \quad a_p := 1.74 \quad b_p := 12.4$$

Cálculo de las condiciones ambientales medias:

$$T_{\text{amb_m}} := \frac{T_{\text{amb_máx}} + T_{\text{amb_mín}}}{2} = 285.65 \text{ K}$$

$$\text{HR}_m := \frac{\text{HR}_{\text{mín}} + \text{HR}_{\text{máx}}}{2} = 0.725$$

$$T_{\text{amb_m_wb}} := \text{HAPropsSI} \left("T_{\text{wb}}", "T", \frac{T_{\text{amb_m}}}{\text{K}}, "P", \frac{P_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, "RH", \text{HR}_m \right) \cdot \text{K} = 283.055 \text{ K}$$

Cálculo de las dimensiones de la torre:

$$T_{\text{wf}} := T_{\text{amb_m_wb}} + \text{Aprox} = 286.055 \text{ K}$$

$$T_{wc} := T_{wf} + \text{Rango} = 301.055 \text{ K}$$

$$i_{wf} := \text{PropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{wf}}{\text{K}}, "P", \frac{P_{atm}}{\text{Pa}}, "Water", \frac{\text{J}}{\text{kg}}\right) = 5.43 \times 10^4 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$i_{wc} := \text{PropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{wc}}{\text{K}}, "P", \frac{P_{atm}}{\text{Pa}}, "Water", \frac{\text{J}}{\text{kg}}\right) = 1.171 \times 10^5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$Q_{\text{torre}} := m_w (i_{wc} - i_{wf}) = 2.844 \times 10^8 \text{ W}$$

$$G_w := 1.42858 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

$$D := \sqrt{\frac{4 \cdot m_w}{\pi \cdot G_w}} = 63.548 \text{ m} \quad \text{Diámetro de la base de la torre}$$

$$z := 1.34 \cdot D = 85.154 \text{ m} \quad \text{Altura de la torre}$$

$$d := 0.62 \cdot D = 39.4 \text{ m} \quad \text{Diámetro de la zona más estrecha de la torre}$$

$$b := 0.12 \cdot D = 7.626 \text{ m} \quad \text{Altura de los soportes de la torre}$$

$$i_{ae} := \text{HAPropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{amb_m}}{\text{K}}, "P", \frac{P_{atm}}{\text{Pa}}, "B", \frac{T_{amb_m_wb}}{\text{K}}\right) \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 2.909 \times 10^4 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$T_{as} := T_{amb_m_wb} + \Delta T_{wb} = 298.055 \text{ K}$$

$$i_{as} := \text{HAPropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{as}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "R", 1\right) \cdot \frac{J}{kg} = 7.611 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$m_a := \frac{Q_{torre}}{i_{as} - i_{ae}} = 6.049 \times 10^3 \frac{kg}{s}$$

$$G_a := \frac{m_a}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}} = 1.907 \frac{kg}{s \cdot m^2}$$

$$\frac{G_w}{G_a} = 0.749$$

Para calcular la longitud del empaquetamiento, calculamos el valor de la integral de Merkel con el método ε -NTU:

$$i_{swc} := \text{HAPropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{wc}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "R", 1\right) \cdot \frac{J}{kg} = 8.953 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$i_{swf} := \text{HAPropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{wf}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "R", 1\right) \cdot \frac{J}{kg} = 3.648 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$T_{wm} := \frac{T_{wc} + T_{wf}}{2} = 293.555 \text{ K}$$

$$i_{swm} := \text{HAPropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{wm}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "R", 1\right) \cdot \frac{J}{kg} = 5.895 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$c_{pw} := \text{PropsSI}\left("C", "T", \frac{T_{wm}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "Water" \right) \cdot \frac{J}{kg \cdot K} = 4.184 \times 10^3 \frac{m^2}{K \cdot s^2}$$

$$C_t := \frac{m_w \cdot c_{pw}}{m_a \cdot \frac{i_{swc} - i_{swf}}{T_{wc} - T_{wf}}} = 0.886$$

$$\lambda := \frac{i_{swc} + i_{swf} - 2 \cdot i_{swm}}{4} = 2.027 \times 10^3 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$\varepsilon_i := \frac{i_{swc} - i_{swf}}{i_{swc} - i_{ae} - \lambda} = 0.908$$

$$NTU_{\min} := \frac{-\ln\left(\frac{1 - \varepsilon_i}{1 - C_t}\right)}{1 - C_t} = 1.878$$

$$IM := NTU_{\min} \cdot \frac{c_{pw}}{\frac{i_{swc} - i_{swf}}{T_{wc} - T_{wf}}} = 2.222$$

$$PF := a_d \cdot \left(\frac{G_w}{G_a}\right)^{-b_d} \cdot \frac{1}{m} = 0.662 \frac{1}{m}$$

$$L_{fi} := \frac{IM}{PF} = 3.355 \text{ m}$$

Por último, calculamos la pérdida de carga a lo largo de la torre, que tiene que ser igual a la suma de la pérdida de carga en el empaquetamiento y la pérdida de carga a la salida de la torre:

$$\omega_{ae} := \text{HAPropsSI}\left("W", "T", \frac{T_{amb_m}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "B", \frac{T_{amb_m_wb}}{K}\right) = 6.546 \times 10^{-3}$$

$$\omega_{as} := \text{HAPropsSI}\left("W", "T", \frac{T_{as}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "R", 1\right) = 0.02$$

$$\xi := \frac{T_{as} - T_{amb_m}}{z} = 0.146 \frac{K}{m}$$

$$\Delta p_t := p_{atm} \cdot \left[\left(1 - 0.00975 \cdot \frac{K}{m} \cdot \frac{1 + \omega_{ae}}{1 + 1.9 \cdot \omega_{ae}} \cdot \frac{b + \frac{L_{fi}}{2}}{T_{amb_m}} \right)^{\frac{2.1778 \cdot (1 + 1.9 \cdot \omega_{ae})}{\omega_{ae} + 0.622}} \cdot \left[1 - \xi \cdot \frac{z - \left(b + \frac{L_{fi}}{2} \right)}{T_{as}} \right]^{\frac{0.021233 \cdot (1 + \omega_{as})}{\xi \cdot (\omega_{as} + 0.622)} \cdot \frac{m}{K}} \right. \\ \left. - \left(1 - 0.00975 \cdot \frac{K}{m} \cdot \frac{1 + \omega_{ae}}{1 + 1.9 \cdot \omega_{ae}} \cdot \frac{z}{T_{amb_m}} \right)^{\frac{2.1778 \cdot (1 + 1.9 \cdot \omega_{ae})}{\omega_{ae} + 0.622}} \right] = 29.665 \text{ Pa}$$

$$v_{ae} := \text{HAPropsSI}\left("V", "T", \frac{T_{amb_m}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "B", \frac{T_{amb_m_wb}}{K}\right) \cdot \frac{m^3}{kg} = 0.817 \frac{m^3}{kg}$$

$$\rho_{ae} := \frac{1}{v_{ae}} = 1.223 \frac{kg}{m^3}$$

$$v_{as} := \text{HAPropsSI}\left("V", "T", \frac{T_{as}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "R", 1\right) \cdot \frac{m^3}{kg} = 0.871 \frac{m^3}{kg} \quad \rho_{as} := \frac{1}{v_{as}} = 1.148 \frac{kg}{m^3}$$

$$v_m := \frac{v_{ae} + v_{as}}{2} = 0.844 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \rho_m := \frac{1}{v_m} = 1.184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$K_{fill} := a_p \cdot \frac{G_w}{G_a} + b_p = 13.703$$

$$v_z := \text{HAPropsSI}\left("V", "T", \frac{T_{amb_m}}{K}, "P", \frac{P_{atm} - \frac{g \cdot z}{v_{ae}}}{Pa}, "B", \frac{T_{amb_m_wb}}{K}\right) \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 0.826 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\rho_z := \frac{1}{v_z} = 1.211 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$Fr_D := \frac{\left[\frac{m_a \cdot (1 + \omega_{as})}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}} \right]^2}{\rho_{as} \cdot (\rho_z - \rho_{as}) \cdot g \cdot d} = 0.914$$

$$K_{to} := \frac{-0.28}{Fr_D} + \frac{0.04}{Fr_D^{1.5}} = -0.26$$

$$\Delta p := K_{fill} \left[G_a \cdot \left(1 + \frac{\omega_{ae} + \omega_{as}}{2} \right) \right]^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot \rho_m} \cdot \left[1 - \xi \cdot \frac{z - \left(b + \frac{L_{fi}}{2} \right)}{T_{as}} \right] + \frac{0.021233 \cdot (1 + \omega_{as})}{\xi \cdot (\omega_{as} + 0.622)} \cdot \frac{\text{m}}{K} + (1 + K_{to}) \cdot \left[\frac{m_a \cdot (1 + \omega_{as})}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}} \right]^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot \rho_{as}} = 29.665 \text{ Pa}$$



Anexo II: Cálculo del ciclo termodinámico, el refrigerador y la torre de refrigeración del ciclo Brayton con regeneración

Ciclo Brayton con regeneración. Periodo 1

Ciclo termodinámico

Datos del yacimiento:

$$z_s := 5000 \cdot \text{m}$$

$$e_{yac} := 305 \cdot \text{m}$$

$$p_{yac} := 200 \cdot \text{bar}$$

$$q_M := 32 \cdot \frac{\text{mW}}{\text{m}^2}$$

$$q_0 := 108.2 \cdot \frac{\text{mW}}{\text{m}^2}$$

$$e_{rad} := 13 \cdot \text{km}$$

$$k := 2.5 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Datos del aire ambiente:

$$T_{amb_m\acute{a}x} := (15 + 273.15) \cdot \text{K} = 288.15 \text{ K}$$

$$T_{amb_m\acute{i}n} := (10 + 273.15) \cdot \text{K} = 283.15 \text{ K}$$

$$HR_{m\acute{i}n} := 70. \%$$

$$HR_{m\acute{a}x} := 75. \%$$

$$p_{atm} := 1 \cdot \text{atm}$$

Datos del fluido de trabajo:

$$Q_{abs} := 3.828 \times 10^8 \text{ W}$$

$$\gamma_t := 1.302 \quad \gamma_c := 1.041$$

$$T_{crit} := \text{PropsSI}("T_{crit}", "T", 273, "P", 1, "CO2") \cdot \text{K} = 304.128 \text{ K}$$

$$P_{crit} := \text{PropsSI}("P_{crit}", "T", 273, "P", 1, "CO2") \cdot \text{Pa} = 7.377 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Otros datos correspondientes al ciclo termodinámico:

$$p_{ref} := 75 \cdot \text{bar}$$

$$\text{Rango} := 15 \cdot \text{K}$$

$$\eta_{p_c} := 90. \%$$

$$\eta_{m_c} := 99.8. \%$$

$$\text{Aprox} := 3 \cdot \text{K}$$

$$\eta_{em_gen} := 98. \%$$

$$\eta_{p_t} := 90. \%$$

$$\eta_{m_t} := 99.8. \%$$

$$\text{Pinch}_t := 3 \cdot \text{K}$$

$$\text{Pinch}_{reg} := 15 \cdot \text{K}$$

Cálculo de las condiciones ambientales medias y de la temperatura del yacimiento:

$$T_{amb_m} := \frac{T_{amb_m\acute{a}x} + T_{amb_m\acute{i}n}}{2} = 285.65 \text{ K}$$

$$HR_m := \frac{HR_{m\acute{i}n} + HR_{m\acute{a}x}}{2} = 0.725$$

$$T_{amb_m_wb} := \text{HAPropsSI}\left("T_{wb}", "T", \frac{T_{amb_m}}{\text{K}}, "P", \frac{p_{atm}}{\text{Pa}}, "RH", HR_m\right) \cdot \text{K} = 283.055 \text{ K}$$

$$q_v := \frac{q_0 - q_M}{e_{rad}} = 5.862 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}} \quad z_m := z_s + \frac{e_{yac}}{2} = 5.152 \times 10^3 \text{ m}$$

$$T_{prod} := T_{amb_m} + \frac{q_0}{k} \cdot z_m - \frac{q_v}{2 \cdot k} \cdot z_m^2 = 477.527 \text{ K}$$

Cálculo de las temperaturas de los distintos puntos del ciclo termodinámico:

$$T_{st} := T_{prod} \cdot \left(\frac{P_{ref}}{P_{yac}} \right)^{\frac{(\gamma_t - 1) \cdot \eta_{p_t}}{\gamma_t}} = 389.112 \text{ K}$$

$$T_{ec} := T_{amb_m_wb} + Aprox + Pinch_T = 289.055 \text{ K}$$

$$T_{sc} := T_{ec} \cdot \left(\frac{P_{yac}}{P_{ref}} \right)^{\frac{\gamma_c - 1}{\gamma_c \cdot \eta_{p_c}}} = 301.732 \text{ K}$$

$$T_{sr} := T_{sc} + Pinch_{reg} = 316.732 \text{ K}$$

$$h_{sc} := PropsSI\left("H", "T", \frac{T_{sc}}{K}, "P", \frac{P_{yac}}{Pa}, "CO2"\right) \cdot \frac{J}{kg} = 2.52 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{st} := PropsSI\left("H", "T", \frac{T_{st}}{K}, "P", \frac{P_{ref}}{Pa}, "CO2"\right) \cdot \frac{J}{kg} = 5.438 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{sr} := PropsSI\left("H", "T", \frac{T_{sr}}{K}, "P", \frac{P_{ref}}{Pa}, "CO2"\right) \cdot \frac{J}{kg} = 4.302 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{iny} := h_{sc} + (h_{st} - h_{sr}) = 3.656 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$T_{iny} := PropsSI\left("T", "H", \frac{h_{iny}}{\frac{J}{kg}}, "P", \frac{P_{yac}}{Pa}, "CO2"\right) \cdot K = 349.083 \text{ K}$$

Cálculo de los valores de entalpía específica en los distintos puntos del ciclo termodinámico:

$$h_{ec} := PropsSI\left("H", "T", \frac{T_{ec}}{K}, "P", \frac{P_{ref}}{Pa}, "CO2"\right) \cdot \frac{J}{kg} = 2.363 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{sc} = 2.52 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{iny} = 3.656 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{prod} := PropsSI\left("H", "T", \frac{T_{prod}}{K}, "P", \frac{P_{yac}}{Pa}, "CO2"\right) \cdot \frac{J}{kg} = 6.038 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{st} = 5.438 \times 10^5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$h_{sr} = 4.302 \times 10^5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Balance de energía:

$$m_{\text{CO}_2} := \frac{Q_{\text{abs}}}{(h_{\text{prod}} - h_{\text{iny}})} = 1.607 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{abs}} = 3.828 \times 10^8 \text{ W}$$

$$Q_{\text{reg}} := m_{\text{CO}_2} (h_{\text{iny}} - h_{\text{sc}}) = 1.826 \times 10^8 \text{ W}$$

$$Q_{\text{ref}} := m_{\text{CO}_2} (h_{\text{sr}} - h_{\text{ec}}) = 3.116 \times 10^8 \text{ W}$$

$$W_t := m_{\text{CO}_2} (h_{\text{prod}} - h_{\text{st}}) \cdot \eta_{m_t} = 9.624 \times 10^7 \text{ W}$$

$$W_c := \frac{m_{\text{CO}_2} (h_{\text{sc}} - h_{\text{ec}})}{\eta_{m_c}} = 2.525 \times 10^7 \text{ W}$$

Cálculo del consumo de agua de la torre de refrigeración:

$$Q_{\text{torre}} := Q_{\text{ref}}$$

$$T_{\text{wf}} := T_{\text{amb_m_wb}} + \text{Aprox} = 286.055 \text{ K}$$

$$T_{\text{wc}} := T_{\text{wf}} + \text{Rango} = 301.055 \text{ K}$$

$$h_{\text{wf}} := \text{PropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{\text{wf}}}{\text{K}}, "P", \frac{P_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, "Water"\right) \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 5.43 \times 10^4 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$h_{\text{wc}} := \text{PropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{\text{wc}}}{\text{K}}, "P", \frac{P_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, "Water"\right) \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 1.171 \times 10^5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$m_w := \frac{Q_{\text{torre}}}{h_{\text{wc}} - h_{\text{wf}}} = 4.964 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Cálculo del rendimiento de la central:

$$W_b := 1.479 \times 10^6 \text{ W} \quad (\text{Del cálculo del refrigerador})$$

$$W_{\text{gen}} := (W_t - W_c) \cdot \eta_{\text{em_gen}} - W_b = 6.809 \times 10^7 \text{ W}$$

$$\eta := \frac{W_{\text{gen}}}{Q_{\text{abs}}} = 0.178$$

Refrigerador

Datos:

$$P_{\text{ref}} := 75 \cdot \text{bar}$$

$$T_{\text{amb_máx}} := (15 + 273.15) \cdot \text{K} = 288.15 \text{ K}$$

$$P_{\text{atm}} := 1 \cdot \text{atm}$$

$$T_{\text{amb_mín}} := (10 + 273.15) \cdot \text{K} = 283.15 \text{ K}$$

$$\text{Aprox} := 3 \cdot \text{K}$$

$$\text{HR}_{\text{mín}} := 70\%$$

$$\text{Rango} := 15 \cdot \text{K}$$

$$\text{HR}_{\text{máx}} := 75\%$$

$$m_{\text{w}} := 4964 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$T_{\text{ec}} := 289.055 \text{ K}$$

$$T_{\text{sr}} := 316.732 \text{ K}$$

$$n_{\text{pt}} := 2$$

$$\eta_{\text{b}} := 90\%$$

$$v := 3 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$D_{\text{e}} := 24 \cdot \text{mm}$$

Galga 25

$$R_{\text{ens}} := 2.4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

Material de los tubos: Cuproniquel 70-30

Cálculo de las condiciones ambientales medias:

$$T_{\text{amb_m}} := \frac{T_{\text{amb_máx}} + T_{\text{amb_mín}}}{2} = 285.65 \text{ K}$$

$$\text{HR}_{\text{m}} := \frac{\text{HR}_{\text{mín}} + \text{HR}_{\text{máx}}}{2} = 0.725$$

$$T_{\text{amb_m_wb}} := \text{HAPropsSI} \left("T_{\text{wb}}", "T", \frac{T_{\text{amb_m}}}{\text{K}}, "P", \frac{P_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, "RH", \text{HR}_{\text{m}} \right) \cdot \text{K} = 283.055 \text{ K}$$

Cálculo de las dimensiones del refrigerador:

En primer lugar, es necesario obtener el valor del coeficiente global de transferencia de calor. Para obtener este valor, haremos uso de la norma del HEI para el cálculo de refrigeradores de superficie para plantas de producción de potencia.

$$e_{\text{galga}} := 0.508 \cdot \text{mm}$$

$$T_{\text{wf}} := T_{\text{amb_m_wb}} + \text{Aprox} = 286.055 \text{ K}$$

$$D_i := D_e - 2 \cdot e_{\text{galga}} = 0.023 \text{ m}$$

$$T_{wc} := T_{wf} + \text{Rango} = 301.055 \text{ K}$$

$$F_m := 0.97$$

$$U_{cl} := 2.7 \cdot \left(\frac{v}{\frac{m}{s}} \right)^{0.5} \cdot \left[0.5707 + 0.0274 \cdot \frac{T_{wf} - 273.15 \cdot K}{K} - 0.00036 \cdot \left(\frac{T_{wf} - 273.15 \cdot K}{K} \right)^2 \right] \cdot F_m \cdot \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot K}$$

$$U_{cl} = 3.921 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{K} \cdot \text{s}^3}$$

$$U := \left(\frac{D_e}{D_i} \cdot R_{\text{ens}} + \frac{1}{U_{cl}} \right)^{-1} = 1.978 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{K} \cdot \text{s}^3}$$

Una vez calculado el coeficiente global de transferencia de calor, calculamos las dimensiones del intercambiador a través de la definición de calor transferido:

$$\Delta T_{lm} := \frac{(T_{ec} - T_{wf}) - (T_{sr} - T_{wc})}{\ln \left(\frac{T_{ec} - T_{wf}}{T_{sr} - T_{wc}} \right)} = 7.666 \text{ K}$$

$$h_{wf} := \text{PropsSI} \left("H", "T", \frac{T_{wf}}{K}, "P", \frac{P_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, "Water" \right) \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 5.43 \times 10^4 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$h_{wc} := \text{PropsSI} \left("H", "T", \frac{T_{wc}}{K}, "P", \frac{P_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, "Water" \right) \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 1.171 \times 10^5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$Q_{\text{ref}} := m_w \cdot (h_{wc} - h_{wf}) = 3.116 \times 10^8 \text{ W}$$

$$A_T := \frac{Q_{\text{ref}}}{U \cdot \Delta T_{lm}} = 2.055 \times 10^4 \text{ m}^2$$

$$T_f := \frac{T_{wc} + T_{wf}}{2} = 293.555 \text{ K}$$

$$\rho_w := \text{PropsSI} \left("D", "T", \frac{T_f}{K}, "P", \frac{P_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, "Water" \right) \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 998.123 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$N_t := \frac{m_w}{\rho_w \cdot v \cdot \pi \cdot \frac{D_i^2}{4}} = 3.996 \times 10^3$$

$$L_c := \frac{A_T}{\pi \cdot D_e \cdot N_t \cdot n_{pt}} = 34.106 \text{ m}$$

$$L_t := n_{pt} \cdot L_c = 68.213 \text{ m}$$

Cálculo de la pérdida de carga del agua en el refrigerador:

$$\mu_w := \text{PropsSI}\left("V", "T", \frac{T_f}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "Water"\right) \cdot (\text{Pa} \cdot \text{s}) = 9.917 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}}$$

$$\text{Re}_w := \frac{\rho_w \cdot v \cdot D_i}{\mu_w} = 6.94 \times 10^4$$

$$f := 4 \cdot \left(1.58 \cdot \ln(\text{Re}_w) - 3.28\right)^{-2} = 0.019$$

$$\Delta p_w := \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot v^2 \cdot \left(1.5 + f \cdot \frac{L_t + 15 \cdot D_i}{D_i}\right) = 2.676 \times 10^5 \text{ Pa} \quad \frac{\Delta p_w}{\rho_w \cdot g} = 27.338 \text{ m}$$

$$W_b := \frac{\Delta p_w \cdot \frac{m_w}{\rho_w}}{\eta_b} = 1.479 \times 10^6 \text{ W}$$

Torre de refrigeración

Datos:

$$p_{\text{atm}} := 1 \cdot \text{atm}$$

$$T_{\text{amb_máx}} := (15 + 273.15) \cdot \text{K} = 288.15 \text{ K}$$

$$\text{Aprox} := 3 \cdot \text{K}$$

$$T_{\text{amb_mín}} := (10 + 273.15) \cdot \text{K} = 283.15 \text{ K}$$

$$\text{Rango} := 15 \cdot \text{K}$$

$$\text{HR}_{\text{mín}} := 70. \%$$

$$m_{\text{w}} := 4964 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\text{HR}_{\text{máx}} := 75. \%$$

$$\Delta T_{\text{wb}} := 15 \cdot \text{K}$$

$$\text{Empaquetamiento: } a_{\text{d}} := 0.56 \quad b_{\text{d}} := 0.58 \quad a_{\text{p}} := 1.74 \quad b_{\text{p}} := 12.4$$

Cálculo de las condiciones ambientales medias:

$$T_{\text{amb_m}} := \frac{T_{\text{amb_máx}} + T_{\text{amb_mín}}}{2} = 285.65 \text{ K}$$

$$\text{HR}_{\text{m}} := \frac{\text{HR}_{\text{mín}} + \text{HR}_{\text{máx}}}{2} = 0.725$$

$$T_{\text{amb_m_wb}} := \text{HAPropsSI}\left("T_{\text{wb}}", "T", \frac{T_{\text{amb_m}}}{\text{K}}, "P", \frac{p_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, "RH", \text{HR}_{\text{m}}\right) \cdot \text{K} = 283.055 \text{ K}$$

Cálculo de las dimensiones de la torre:

$$T_{\text{wf}} := T_{\text{amb_m_wb}} + \text{Aprox} = 286.055 \text{ K}$$

$$T_{\text{wc}} := T_{\text{wf}} + \text{Rango} = 301.055 \text{ K}$$

$$i_{wf} := \text{PropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{wf}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "Water", \frac{J}{kg}\right) = 5.43 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$i_{wc} := \text{PropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{wc}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "Water", \frac{J}{kg}\right) = 1.171 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$Q_{torre} := m_w \cdot (i_{wc} - i_{wf}) = 3.116 \times 10^8 \text{ W}$$

$$G_w := 1.4556 \cdot \frac{kg}{s \cdot m^2}$$

$$D := \sqrt{\frac{4 \cdot m_w}{\pi \cdot G_w}} = 65.895 \text{ m} \quad \text{Diámetro de la base de la torre}$$

$$z := 1.34 \cdot D = 88.299 \text{ m} \quad \text{Altura de la torre}$$

$$d := 0.62 \cdot D = 40.855 \text{ m} \quad \text{Diámetro de la zona más estrecha de la torre}$$

$$b := 0.12 \cdot D = 7.907 \text{ m} \quad \text{Altura de los soportes de la torre}$$

$$i_{ae} := \text{HAPropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{amb_m}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "B", \frac{T_{amb_m_wb}}{K}, \frac{J}{kg}\right) = 2.909 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$T_{as} := T_{amb_m_wb} + \Delta T_{wb} = 298.055 \text{ K}$$

$$i_{as} := \text{HAPropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{as}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "R", 1\right) \cdot \frac{J}{kg} = 7.611 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$m_a := \frac{Q_{torre}}{i_{as} - i_{ae}} = 6.627 \times 10^3 \frac{kg}{s}$$

$$G_a := \frac{m_a}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}} = 1.943 \frac{kg}{s \cdot m^2}$$

$$\frac{G_w}{G_a} = 0.749$$

Para calcular la longitud del empaquetamiento, calculamos el valor de la integral de Merkel con el método ε -NTU:

$$i_{swc} := \text{HAPropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{wc}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "R", 1\right) \cdot \frac{J}{kg} = 8.953 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$i_{swf} := \text{HAPropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{wf}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "R", 1\right) \cdot \frac{J}{kg} = 3.648 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$T_{wm} := \frac{T_{wc} + T_{wf}}{2} = 293.555 K$$

$$i_{swm} := \text{HAPropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{wm}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "R", 1\right) \cdot \frac{J}{kg} = 5.895 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$c_{pw} := \text{PropsSI}\left("C", "T", \frac{T_{wm}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "Water"\right) \cdot \frac{J}{kg \cdot K} = 4.184 \times 10^3 \frac{m^2}{K \cdot s^2}$$

$$C_t := \frac{m_w \cdot c_{pw}}{m_a \cdot \frac{i_{swc} - i_{swf}}{T_{wc} - T_{wf}}} = 0.886$$

$$\lambda := \frac{i_{swc} + i_{swf} - 2 \cdot i_{swm}}{4} = 2.027 \times 10^3 \frac{m^2}{s}$$

$$\varepsilon_i := \frac{i_{swc} - i_{swf}}{i_{swc} - i_{ae} - \lambda} = 0.908$$

$$NTU_{min} := \frac{-\ln\left(\frac{1 - \varepsilon_i}{1 - C_t}\right)}{1 - C_t} = 1.878$$

$$IM := NTU_{min} \cdot \frac{c_{pw}}{\frac{i_{swc} - i_{swf}}{T_{wc} - T_{wf}}} = 2.222$$

$$PF := a_d \cdot \left(\frac{G_w}{G_a}\right)^{-b_d} \cdot \frac{1}{m} = 0.662 \frac{1}{m}$$

$$L_{fi} := \frac{IM}{PF} = 3.355 m$$

Por último, calculamos la pérdida de carga a lo largo de la torre, que tiene que ser igual a la suma de la pérdida de carga en el empaquetamiento y la pérdida de carga a la salida de la torre:

$$\omega_{ae} := \text{HAPropsSI}\left("W", "T", \frac{T_{amb_m}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "B", \frac{T_{amb_m_wb}}{K}\right) = 6.546 \times 10^{-3}$$

$$\omega_{as} := \text{HAPropsSI}\left("W", "T", \frac{T_{as}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "R", 1\right) = 0.02$$

$$\xi := \frac{T_{as} - T_{amb_m}}{z} = 0.14 \frac{K}{m}$$

$$\Delta p_t := P_{atm} \cdot \left[\left(1 - 0.00975 \cdot \frac{K}{m} \cdot \frac{1 + \omega_{ae}}{1 + 1.9 \cdot \omega_{ae}} \cdot \frac{b + \frac{L_{fi}}{2}}{T_{amb_m}} \right)^{\frac{2.1778 \cdot (1 + 1.9 \cdot \omega_{ae})}{\omega_{ae} + 0.622}} \cdot \left[1 - \xi \cdot \frac{z - \left(b + \frac{L_{fi}}{2} \right)}{T_{as}} \right]^{\frac{0.021233 \cdot (1 + \omega_{as})}{\xi \cdot (\omega_{as} + 0.622) \cdot \frac{m}{K}}} \right. \\ \left. - \left(1 - 0.00975 \cdot \frac{K}{m} \cdot \frac{1 + \omega_{ae}}{1 + 1.9 \cdot \omega_{ae}} \cdot \frac{z}{T_{amb_m}} \right)^{\frac{2.1778 \cdot (1 + 1.9 \cdot \omega_{ae})}{\omega_{ae} + 0.622}} \right] = 30.814 \text{ Pa}$$

$$v_{ae} := \text{HAPropsSI}\left("V", "T", \frac{T_{amb_m}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "B", \frac{T_{amb_m_wb}}{K}\right) \cdot \frac{m^3}{kg} = 0.817 \frac{m^3}{kg}$$

$$\rho_{ae} := \frac{1}{v_{ae}} = 1.223 \frac{kg}{m^3}$$

$$v_{as} := \text{HAPropsSI}\left("V", "T", \frac{T_{as}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "R", 1\right) \cdot \frac{m^3}{kg} = 0.871 \frac{m^3}{kg} \quad \rho_{as} := \frac{1}{v_{as}} = 1.148 \frac{kg}{m^3}$$

$$v_m := \frac{v_{ae} + v_{as}}{2} = 0.844 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \rho_m := \frac{1}{v_m} = 1.184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$K_{\text{fill}} := a_p \cdot \frac{G_w}{G_a} + b_p = 13.703$$

$$v_z := \text{HAPropsSI} \left("V", "T", \frac{T_{\text{amb_m}}}{K}, "P", \frac{P_{\text{atm}} - \frac{g \cdot z}{v_{ae}}}{P_a}, "B", \frac{T_{\text{amb_m_wb}}}{K} \right) \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 0.826 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\rho_z := \frac{1}{v_z} = 1.211 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Fr}_D := \frac{\left[\frac{m_a \cdot (1 + \omega_{as})}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}} \right]^2}{\rho_{as} \cdot (\rho_z - \rho_{as}) \cdot g \cdot d} = 0.922$$

$$K_{\text{to}} := \frac{-0.28}{\text{Fr}_D} + \frac{0.04}{\text{Fr}_D^{1.5}} = -0.258$$

$$\Delta p := K_{\text{fill}} \cdot \left[G_a \cdot \left(1 + \frac{\omega_{ae} + \omega_{as}}{2} \right) \right]^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot \rho_m} \cdot \left[1 - \xi \cdot \frac{z - \left(b + \frac{L_{fi}}{2} \right)}{T_{as}} \right] + \left(1 + K_{\text{to}} \right) \cdot \frac{\frac{0.021233 \cdot (1 + \omega_{as})}{\xi \cdot (\omega_{as} + 0.622)} \cdot \frac{\text{m}}{\text{K}}}{\left[\frac{m_a \cdot (1 + \omega_{as})}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}} \right]^2} \cdot \frac{1}{2 \cdot \rho_{as}} = 30.814 \text{ Pa}$$

Ciclo Brayton con regeneración. Periodo 2

Ciclo termodinámico

Datos del yacimiento:

$$p_{yac} := 200 \cdot \text{bar}$$

Datos del aire ambiente:

$$T_{amb_m\acute{a}x} := (15 + 273.15) \cdot K = 288.15 K$$

$$T_{amb_m\acute{i}n} := (10 + 273.15) \cdot K = 283.15 K$$

$$HR_{m\acute{i}n} := 70\%$$

$$HR_{m\acute{a}x} := 75\%$$

$$p_{atm} := 1 \cdot \text{atm}$$

Datos del fluido de trabajo:

$$Q_{abs} := 3.188 \times 10^8 W$$

$$\gamma_t := 1.322 \quad \gamma_c := 1.041$$

$$T_{crit} := \text{PropsSI}("T_{crit}", "T", 273, "P", 1, "CO2") \cdot K = 304.128 K$$

$$P_{crit} := \text{PropsSI}("P_{crit}", "T", 273, "P", 1, "CO2") \cdot Pa = 7.377 \times 10^6 Pa$$

Otros datos correspondientes al ciclo termodinámico:

$$p_{ref} := 75 \cdot \text{bar} \quad \text{Rango} := 15 \cdot K \quad \eta_{p_c} := 90\% \quad \eta_{m_c} := 99.8\%$$

$$\text{Aprox} := 3 \cdot K \quad \eta_{em_gen} := 98\% \quad \eta_{p_t} := 90\% \quad \eta_{m_t} := 99.8\%$$

$$\text{Pinch}_I := 3 \cdot K \quad \text{Pinch}_{reg} := 15 \cdot K$$

Cálculo de las condiciones ambientales medias:

$$T_{amb_m} := \frac{T_{amb_m\acute{a}x} + T_{amb_m\acute{i}n}}{2} = 285.65 K$$

$$HR_m := \frac{HR_{m\acute{i}n} + HR_{m\acute{a}x}}{2} = 0.725$$

$$T_{amb_m_wb} := \text{HAPropsSI}\left("T_{wb}", "T", \frac{T_{amb_m}}{K}, "P", \frac{p_{atm}}{Pa}, "RH", HR_m\right) \cdot K = 283.055 K$$

Cálculo de las temperaturas de los distintos puntos del ciclo termodinámico:

$$T_{prod} := (152.2 + 273.15) \cdot K = 425.35 K$$

$$T_{st} := T_{prod} \cdot \left(\frac{p_{ref}}{p_{yac}} \right)^{\frac{(\gamma_t - 1) \cdot \eta_{p_t}}{\gamma_t}} = 343.059 K$$

$$T_{ec} := T_{amb_m_wb} + Aprox + Pinch_T = 289.055 \text{ K}$$

$$T_{sc} := T_{ec} \cdot \left(\frac{P_{yac}}{P_{ref}} \right)^{\frac{\gamma_c - 1}{\gamma_c \cdot \eta_{p_c}}} = 301.732 \text{ K}$$

$$T_{sr} := T_{sc} + Pinch_{reg} = 316.732 \text{ K}$$

$$h_{sc} := PropsSI\left("H", "T", \frac{T_{sc}}{K}, "P", \frac{P_{yac}}{Pa}, "CO2"\right) \cdot \frac{J}{kg} = 2.52 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{st} := PropsSI\left("H", "T", \frac{T_{st}}{K}, "P", \frac{P_{ref}}{Pa}, "CO2"\right) \cdot \frac{J}{kg} = 4.814 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{sr} := PropsSI\left("H", "T", \frac{T_{sr}}{K}, "P", \frac{P_{ref}}{Pa}, "CO2"\right) \cdot \frac{J}{kg} = 4.302 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{iny} := h_{sc} + (h_{st} - h_{sr}) = 3.032 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$T_{iny} := PropsSI\left("T", "H", \frac{h_{iny}}{\frac{J}{kg}}, "P", \frac{P_{yac}}{Pa}, "CO2"\right) \cdot K = 324.439 \text{ K}$$

Cálculo de los valores de entalpía específica en los distintos puntos del ciclo termodinámico:

$$h_{ec} := PropsSI\left("H", "T", \frac{T_{ec}}{K}, "P", \frac{P_{ref}}{Pa}, "CO2"\right) \cdot \frac{J}{kg} = 2.363 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{sc} = 2.52 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{iny} = 3.032 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{prod} := PropsSI\left("H", "T", \frac{T_{prod}}{K}, "P", \frac{P_{yac}}{Pa}, "CO2"\right) \cdot \frac{J}{kg} = 5.268 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{st} = 4.814 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$h_{sr} = 4.302 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

Balance de energía:

$$m_{\text{CO}_2} := \frac{Q_{\text{abs}}}{(h_{\text{prod}} - h_{\text{iny}})} = 1.426 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{abs}} = 3.188 \times 10^8 \text{ W}$$

$$Q_{\text{reg}} := m_{\text{CO}_2} \cdot (h_{\text{iny}} - h_{\text{sc}}) = 7.307 \times 10^7 \text{ W}$$

$$Q_{\text{ref}} := m_{\text{CO}_2} \cdot (h_{\text{sr}} - h_{\text{ec}}) = 2.765 \times 10^8 \text{ W}$$

$$W_t := m_{\text{CO}_2} \cdot (h_{\text{prod}} - h_{\text{st}}) \cdot \eta_{\text{m}_t} = 6.454 \times 10^7 \text{ W}$$

$$W_c := \frac{m_{\text{CO}_2} \cdot (h_{\text{sc}} - h_{\text{ec}})}{\eta_{\text{m}_c}} = 2.241 \times 10^7 \text{ W}$$

Cálculo del consumo de agua de la torre de refrigeración:

$$Q_{\text{torre}} := Q_{\text{ref}}$$

$$T_{\text{wf}} := T_{\text{amb}_m_{\text{wb}}} + \text{Aprox} = 286.055 \text{ K}$$

$$T_{\text{wc}} := T_{\text{wf}} + \text{Rango} = 301.055 \text{ K}$$

$$h_{\text{wf}} := \text{PropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{\text{wf}}}{\text{K}}, "P", \frac{P_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, "Water"\right) \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 5.43 \times 10^4 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$h_{\text{wc}} := \text{PropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{\text{wc}}}{\text{K}}, "P", \frac{P_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, "Water"\right) \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 1.171 \times 10^5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$m_w := \frac{Q_{\text{torre}}}{h_{\text{wc}} - h_{\text{wf}}} = 4.405 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Cálculo del rendimiento de la central:

$$W_b := 1.312 \times 10^6 \text{ W} \quad (\text{Del cálculo del refrigerador})$$

$$W_{\text{gen}} := (W_t - W_c) \cdot \eta_{\text{em}_{\text{gen}}} - W_b = 3.997 \times 10^7 \text{ W}$$

$$\eta := \frac{W_{\text{gen}}}{Q_{\text{abs}}} = 0.125$$

Refrigerador

Datos:

$$p_{\text{ref}} := 75 \cdot \text{bar}$$

$$T_{\text{amb_máx}} := (15 + 273.15) \cdot \text{K} = 288.15 \text{ K}$$

$$p_{\text{atm}} := 1 \cdot \text{atm}$$

$$T_{\text{amb_mín}} := (10 + 273.15) \cdot \text{K} = 283.15 \text{ K}$$

$$\text{Aprox} := 3 \cdot \text{K}$$

$$\text{HR}_{\text{mín}} := 70\%$$

$$\text{Rango} := 15 \cdot \text{K}$$

$$\text{HR}_{\text{máx}} := 75\%$$

$$m_{\text{w}} := 4405 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$T_{\text{ec}} := 289.055 \text{ K}$$

$$T_{\text{sr}} := 316.732 \text{ K}$$

$$n_{\text{pt}} := 2$$

$$\eta_{\text{b}} := 90\%$$

$$v := 3 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$D_{\text{e}} := 24 \cdot \text{mm}$$

Galga 25

$$R_{\text{ens}} := 2.4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

Material de los tubos: Cuproniquel 70-30

Cálculo de las condiciones ambientales medias:

$$T_{\text{amb_m}} := \frac{T_{\text{amb_máx}} + T_{\text{amb_mín}}}{2} = 285.65 \text{ K}$$

$$\text{HR}_{\text{m}} := \frac{\text{HR}_{\text{mín}} + \text{HR}_{\text{máx}}}{2} = 0.725$$

$$T_{\text{amb_m_wb}} := \text{HAPropsSI}\left("T_{\text{wb}}", "T", \frac{T_{\text{amb_m}}}{\text{K}}, "P", \frac{p_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, "RH", \text{HR}_{\text{m}}\right) \cdot \text{K} = 283.055 \text{ K}$$

Cálculo de las dimensiones del refrigerador:

En primer lugar, es necesario obtener el valor del coeficiente global de transferencia de calor. Para obtener este valor, haremos uso de la norma del HEI para el cálculo de refrigeradores de superficie para plantas de producción de potencia.

$$e_{\text{galga}} := 0.508 \cdot \text{mm}$$

$$T_{\text{wf}} := T_{\text{amb_m_wb}} + \text{Aprox} = 286.055 \text{ K}$$

$$D_i := D_e - 2 \cdot e_{\text{galga}} = 0.023 \text{ m} \quad T_{wc} := T_{wf} + \text{Rango} = 301.055 \text{ K}$$

$$F_m := 0.97$$

$$U_{cl} := 2.7 \cdot \left(\frac{v}{\frac{m}{s}} \right)^{0.5} \cdot \left[0.5707 + 0.0274 \cdot \frac{T_{wf} - 273.15 \cdot K}{K} - 0.00036 \cdot \left(\frac{T_{wf} - 273.15 \cdot K}{K} \right)^2 \right] \cdot F_m \cdot \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot K}$$

$$U_{cl} = 3.921 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{K} \cdot \text{s}^3}$$

$$U := \left(\frac{D_e}{D_i} \cdot R_{\text{ens}} + \frac{1}{U_{cl}} \right)^{-1} = 1.978 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{K} \cdot \text{s}^3}$$

Una vez calculado el coeficiente global de transferencia de calor, calculamos las dimensiones del intercambiador a través de la definición de calor transferido:

$$\Delta T_{lm} := \frac{(T_{ec} - T_{wf}) - (T_{sr} - T_{wc})}{\ln \left(\frac{T_{ec} - T_{wf}}{T_{sr} - T_{wc}} \right)} = 7.666 \text{ K}$$

$$h_{wf} := \text{PropsSI} \left("H", "T", \frac{T_{wf}}{K}, "P", \frac{P_{\text{atm}}}{Pa}, "Water" \right) \cdot \frac{J}{kg} = 5.43 \times 10^4 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$h_{wc} := \text{PropsSI} \left("H", "T", \frac{T_{wc}}{K}, "P", \frac{P_{\text{atm}}}{Pa}, "Water" \right) \cdot \frac{J}{kg} = 1.171 \times 10^5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$Q_{\text{ref}} := m_w \cdot (h_{wc} - h_{wf}) = 2.765 \times 10^8 \text{ W}$$

$$A_T := \frac{Q_{\text{ref}}}{U \cdot \Delta T_{lm}} = 1.824 \times 10^4 \text{ m}^2$$

$$T_f := \frac{T_{wc} + T_{wf}}{2} = 293.555 \text{ K}$$

$$\rho_w := \text{PropsSI} \left("D", "T", \frac{T_f}{K}, "P", \frac{P_{\text{atm}}}{Pa}, "Water" \right) \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 998.123 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$N_t := \frac{m_w}{\rho_w \cdot v \cdot \pi \cdot \frac{D_i^2}{4}} = 3.546 \times 10^3$$

$$L_c := \frac{A_T}{\pi \cdot D_e \cdot N_t \cdot n_{pt}} = 34.106 \text{ m}$$

$$L_t := n_{pt} \cdot L_c = 68.213 \text{ m}$$

Cálculo de la pérdida de carga del agua en el refrigerador:

$$\mu_w := \text{PropsSI}\left("V", "T", \frac{T_f}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "Water"\right) \cdot (\text{Pa} \cdot \text{s}) = 9.917 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}}$$

$$\text{Re}_w := \frac{\rho_w \cdot v \cdot D_i}{\mu_w} = 6.94 \times 10^4$$

$$f := 4 \cdot \left(1.58 \cdot \ln(\text{Re}_w) - 3.28\right)^{-2} = 0.019$$

$$\Delta p_w := \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot v^2 \cdot \left(1.5 + f \cdot \frac{L_t + 15 \cdot D_i}{D_i}\right) = 2.676 \times 10^5 \text{ Pa} \qquad \frac{\Delta p_w}{\rho_w \cdot g} = 27.338 \text{ m}$$

$$W_b := \frac{\Delta p_w \cdot \frac{m_w}{\rho_w}}{\eta_b} = 1.312 \times 10^6 \text{ W}$$

Torre de refrigeración

Datos:

$$P_{\text{atm}} := 1 \cdot \text{atm}$$

$$T_{\text{amb_máx}} := (15 + 273.15) \cdot \text{K} = 288.15 \text{ K}$$

$$\text{Aprox} := 3 \cdot \text{K}$$

$$T_{\text{amb_mín}} := (10 + 273.15) \cdot \text{K} = 283.15 \text{ K}$$

$$\text{Rango} := 15 \cdot \text{K}$$

$$\text{HR}_{\text{mín}} := 70. \%$$

$$m_{\text{w}} := 4405 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\text{HR}_{\text{máx}} := 75. \%$$

$$\Delta T_{\text{wb}} := 15 \cdot \text{K}$$

$$\text{Empaquetamiento: } a_{\text{d}} := 0.56 \quad b_{\text{d}} := 0.58 \quad a_{\text{p}} := 1.74 \quad b_{\text{p}} := 12.4$$

Cálculo de las condiciones ambientales medias:

$$T_{\text{amb_m}} := \frac{T_{\text{amb_máx}} + T_{\text{amb_mín}}}{2} = 285.65 \text{ K}$$

$$\text{HR}_{\text{m}} := \frac{\text{HR}_{\text{mín}} + \text{HR}_{\text{máx}}}{2} = 0.725$$

$$T_{\text{amb_m_wb}} := \text{HAPropsSI} \left("T_{\text{wb}}", "T", \frac{T_{\text{amb_m}}}{\text{K}}, "P", \frac{P_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, "RH", \text{HR}_{\text{m}} \right) \cdot \text{K} = 283.055 \text{ K}$$

Cálculo de las dimensiones de la torre:

$$T_{\text{wf}} := T_{\text{amb_m_wb}} + \text{Aprox} = 286.055 \text{ K}$$

$$T_{\text{wc}} := T_{\text{wf}} + \text{Rango} = 301.055 \text{ K}$$

$$i_{\text{wf}} := \text{PropsSI} \left("H", "T", \frac{T_{\text{wf}}}{\text{K}}, "P", \frac{P_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, "Water" \right) \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 5.43 \times 10^4 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$i_{wc} := \text{PropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{wc}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "Water", \frac{J}{kg}\right) = 1.171 \times 10^5 \frac{m^2}{s^2}$$

$$Q_{torre} := m_w \cdot (i_{wc} - i_{wf}) = 2.765 \times 10^8 \text{ W}$$

$$G_w := 1.420325 \cdot \frac{kg}{s \cdot m^2}$$

$$D := \sqrt{\frac{4 \cdot m_w}{\pi \cdot G_w}} = 62.84 \text{ m} \quad \text{Diámetro de la base de la torre}$$

$$z := 1.34 \cdot D = 84.205 \text{ m} \quad \text{Altura de la torre}$$

$$d := 0.62 \cdot D = 38.961 \text{ m} \quad \text{Diámetro de la zona más estrecha de la torre}$$

$$b := 0.12 \cdot D = 7.541 \text{ m} \quad \text{Altura de los soportes de la torre}$$

$$i_{ae} := \text{HAPropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{amb_m}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "B", \frac{T_{amb_m_wb}}{K}, \frac{J}{kg}\right) = 2.909 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$T_{as} := T_{amb_m_wb} + \Delta T_{wb} = 298.055 \text{ K}$$

$$i_{as} := \text{HAPropsSI}\left("H", "T", \frac{T_{as}}{K}, "P", \frac{P_{atm}}{Pa}, "R", 1, \frac{J}{kg}\right) = 7.611 \times 10^4 \frac{m^2}{s^2}$$

$$m_a := \frac{Q_{torre}}{i_{as} - i_{ae}} = 5.881 \times 10^3 \frac{kg}{s}$$

$$G_a := \frac{m_a}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}} = 1.896 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

$$\frac{G_w}{G_a} = 0.749$$

Para calcular la longitud del empaquetamiento, calculamos el valor de la integral de Merkel con el método ε -NTU:

$$i_{\text{swc}} := \text{HAPropsSI}\left(\text{"H"}, \text{"T"}, \frac{T_{\text{wc}}}{\text{K}}, \text{"P"}, \frac{P_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, \text{"R"}, 1\right) \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 8.953 \times 10^4 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$i_{\text{swf}} := \text{HAPropsSI}\left(\text{"H"}, \text{"T"}, \frac{T_{\text{wf}}}{\text{K}}, \text{"P"}, \frac{P_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, \text{"R"}, 1\right) \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 3.648 \times 10^4 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$T_{\text{wm}} := \frac{T_{\text{wc}} + T_{\text{wf}}}{2} = 293.555 \text{ K}$$

$$i_{\text{swm}} := \text{HAPropsSI}\left(\text{"H"}, \text{"T"}, \frac{T_{\text{wm}}}{\text{K}}, \text{"P"}, \frac{P_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, \text{"R"}, 1\right) \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 5.895 \times 10^4 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$c_{\text{pw}} := \text{PropsSI}\left(\text{"C"}, \text{"T"}, \frac{T_{\text{wm}}}{\text{K}}, \text{"P"}, \frac{P_{\text{atm}}}{\text{Pa}}, \text{"Water"}\right) \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} = 4.184 \times 10^3 \frac{\text{m}^2}{\text{K} \cdot \text{s}^2}$$

$$C_t := \frac{m_w \cdot c_{\text{pw}}}{m_a \cdot \frac{i_{\text{swc}} - i_{\text{swf}}}{T_{\text{wc}} - T_{\text{wf}}}} = 0.886$$

$$\lambda := \frac{i_{\text{swc}} + i_{\text{swf}} - 2 \cdot i_{\text{swm}}}{4} = 2.027 \times 10^3 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$\varepsilon_i := \frac{i_{\text{swc}} - i_{\text{swf}}}{i_{\text{swc}} - i_{\text{ae}} - \lambda} = 0.908$$

$$\text{NTU}_{\min} := \frac{-\ln\left(\frac{1 - \varepsilon_i}{1 - C_t}\right)}{1 - C_t} = 1.878$$

$$\text{IM} := \text{NTU}_{\min} \cdot \frac{c_{\text{pw}}}{\frac{i_{\text{swc}} - i_{\text{swf}}}{T_{\text{wc}} - T_{\text{wf}}}} = 2.222$$

$$\text{PF} := a_d \cdot \left(\frac{G_w}{G_a}\right)^{-b_d} \cdot \frac{1}{\text{m}} = 0.662 \frac{1}{\text{m}}$$

$$L_{\text{fi}} := \frac{\text{IM}}{\text{PF}} = 3.355 \text{ m}$$

Por último, calculamos la pérdida de carga a lo largo de la torre, que tiene que ser igual a la suma de la pérdida de carga en el empaquetamiento y la pérdida de carga a la salida de la torre:

$$\omega_{ae} := \text{HAPropsSI}\left("W", "T", \frac{T_{amb_m}}{K}, "P", \frac{p_{atm}}{Pa}, "B", \frac{T_{amb_m_wb}}{K}\right) = 6.546 \times 10^{-3}$$

$$\omega_{as} := \text{HAPropsSI}\left("W", "T", \frac{T_{as}}{K}, "P", \frac{p_{atm}}{Pa}, "R", 1\right) = 0.02$$

$$\xi := \frac{T_{as} - T_{amb_m}}{z} = 0.147 \frac{K}{m}$$

$$\Delta p_t := p_{atm} \left[\left(1 - 0.00975 \cdot \frac{K}{m} \cdot \frac{1 + \omega_{ae}}{1 + 1.9 \cdot \omega_{ae}} \cdot \frac{b + \frac{L_{fi}}{2}}{T_{amb_m}} \right)^{\frac{2.1778 \cdot (1 + 1.9 \cdot \omega_{ae})}{\omega_{ae} + 0.622}} \left[1 - \xi \cdot \frac{z - \left(b + \frac{L_{fi}}{2} \right)}{T_{as}} \right]^{\frac{0.021233 \cdot (1 + \omega_{as})}{\xi \cdot (\omega_{as} + 0.622) \cdot \frac{m}{K}}} \right. \\ \left. - \left(1 - 0.00975 \cdot \frac{K}{m} \cdot \frac{1 + \omega_{ae}}{1 + 1.9 \cdot \omega_{ae}} \cdot \frac{z}{T_{amb_m}} \right)^{\frac{2.1778 \cdot (1 + 1.9 \cdot \omega_{ae})}{\omega_{ae} + 0.622}} \right] = 29.319 \text{ Pa}$$

$$v_{ae} := \text{HAPropsSI}\left("V", "T", \frac{T_{amb_m}}{K}, "P", \frac{p_{atm}}{Pa}, "B", \frac{T_{amb_m_wb}}{K}\right) \cdot \frac{m^3}{kg} = 0.817 \frac{m^3}{kg}$$

$$\rho_{ae} := \frac{1}{v_{ae}} = 1.223 \frac{kg}{m^3}$$

$$v_{as} := \text{HAPropsSI}\left("V", "T", \frac{T_{as}}{K}, "P", \frac{p_{atm}}{Pa}, "R", 1\right) \cdot \frac{m^3}{kg} = 0.871 \frac{m^3}{kg} \quad \rho_{as} := \frac{1}{v_{as}} = 1.148 \frac{kg}{m^3}$$

$$v_m := \frac{v_{ae} + v_{as}}{2} = 0.844 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\rho_m := \frac{1}{v_m} = 1.184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$K_{\text{fill}} := a_p \cdot \frac{G_w}{G_a} + b_p = 13.703$$

$$v_z := \text{HAPropsSI}\left(\text{"V"}, \text{"T"}, \frac{T_{\text{amb_m}}}{\text{K}}, \text{"P"}, \frac{P_{\text{atm}} - \frac{g \cdot z}{v_{ae}}}{\text{Pa}}, \text{"B"}, \frac{T_{\text{amb_m_wb}}}{\text{K}}\right) \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 0.826 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\rho_z := \frac{1}{v_z} = 1.211 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Fr}_D := \frac{\left[\frac{m_a \cdot (1 + \omega_{as})}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}} \right]^2}{\rho_{as} \cdot (\rho_z - \rho_{as}) \cdot g \cdot d} = 0.912$$

$$K_{\text{to}} := \frac{-0.28}{\text{Fr}_D} + \frac{0.04}{\text{Fr}_D^{1.5}} = -0.261$$

$$\Delta p := K_{\text{fill}} \left[G_a \cdot \left(1 + \frac{\omega_{ae} + \omega_{as}}{2} \right) \right]^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot \rho_m} \cdot \left[1 - \xi \cdot \frac{z - \left(b + \frac{L_{\text{fi}}}{2} \right)}{T_{as}} \right] + \left(1 + K_{\text{to}} \right) \cdot \frac{\frac{0.021233 \cdot (1 + \omega_{as})}{\xi \cdot (\omega_{as} + 0.622) \cdot \frac{\text{m}}{\text{K}}} \cdot \left[\frac{m_a \cdot (1 + \omega_{as})}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}} \right]^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot \rho_{as}}}{2 \cdot \rho_{as}} = 29.319 \text{ Pa}$$



Anexo III: Análisis económico de las distintas alternativas

1. Ciclo Brayton Simple: Escenario 1

Año	0	1	2	3	4	5	6
Ingresos							
Energía generada [MWh]							
Precio energía [€/MWh]							
Ingresos totales [M€]							
Gastos							
Inversión [M€]	78,29	78,29	78,29	78,29	78,29	78,29	78,29
Gastos O&M [M€]							
Gastos CO ₂ [M€]							
Gastos totales [M€]	78,29	78,29	78,29	78,29	78,29	78,29	78,29
EBITDA [M€]							
Amortización [M€]							
EBIT							
Impuestos [M€]							
BDI [M€]							
Flujo de caja [M€]	-78,29	-78,29	-78,29	-78,29	-78,29	-78,29	-78,29
Flujo de caja acumulado [M€]	-78,29	-156,59	-234,88	-313,18	-391,47	-469,76	-548,06
Flujo de caja actualizado [M€]	-78,29	-73,86	-69,68	-65,74	-62,02	-58,51	-55,19
VAN [M€]	-78,29	-152,16	-221,84	-287,57	-349,59	-408,10	-463,29
TIR [%]	-203,27						



7	8	9	10	11	12	13
367315,56	367315,56	367315,56	367315,56	367315,56	367315,56	367315,56
53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
19,81	19,81	19,81	19,81	19,81	19,81	19,81
9,05	9,05	9,05	9,05	9,05	9,05	9,05
74,97	74,97	74,97	74,97	74,97	74,97	74,97
84,02	84,02	84,02	84,02	84,02	84,02	84,02
-64,22	-64,22	-64,22	-64,22	-64,22	-64,22	-64,22
1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38
-65,60	-65,60	-65,60	-65,60	-65,60	-65,60	-65,60
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-65,60	-65,60	-65,60	-65,60	-65,60	-65,60	-65,60
-64,22	-64,22	-64,22	-64,22	-64,22	-64,22	-64,22
-612,27	-676,49	-740,71	-804,93	-869,14	-933,36	-997,58
-42,71	-40,29	-38,01	-35,86	-33,83	-31,91	-30,11
-506,00	-546,29	-584,30	-620,16	-653,99	-685,90	-716,01

14	15	16	17	18	19	20
367315,56	367315,56	367315,56	367315,56	367315,56	367315,56	367315,56
53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
19,81	19,81	19,81	19,81	19,81	19,81	19,81
9,05	9,05	9,05	9,05	9,05	9,05	9,05
74,97	74,97	74,97	74,97	74,97	74,97	74,97
84,02	84,02	84,02	84,02	84,02	84,02	84,02
-64,22	-64,22	-64,22	-64,22	-64,22	-64,22	-64,22
1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38
-65,60	-65,60	-65,60	-65,60	-65,60	-65,60	-65,60
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-65,60	-65,60	-65,60	-65,60	-65,60	-65,60	-65,60
-64,22	-64,22	-64,22	-64,22	-64,22	-64,22	-64,22
-1061,79	-1126,01	-1190,23	-1254,44	-1318,66	-1382,88	-1447,09
-28,40	-26,80	-25,28	-23,85	-22,50	-21,22	-20,02
-744,41	-771,21	-796,48	-820,33	-842,83	-864,05	-884,08



21	22	23	24	25	26	27
367315,56	259068,24	259068,24	259068,24	259068,24	259068,24	259068,24
53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
19,81	13,97	13,97	13,97	13,97	13,97	13,97
9,05	9,05	9,05	9,05	9,05	9,05	9,05
74,97	80,47	80,47	80,47	80,47	80,47	80,47
84,02	89,52	89,52	89,52	89,52	89,52	89,52
-64,22	-75,55	-75,55	-75,55	-75,55	-75,55	-75,55
1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38
-65,60	-76,93	-76,93	-76,93	-76,93	-76,93	-76,93
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-65,60	-76,93	-76,93	-76,93	-76,93	-76,93	-76,93
-64,22	-75,55	-75,55	-75,55	-75,55	-75,55	-75,55
-1511,31	-1586,86	-1662,42	-1737,97	-1813,52	-1889,07	-1964,63
-18,89	-20,97	-19,78	-18,66	-17,60	-16,61	-15,67
-902,97	-923,93	-943,71	-962,37	-979,98	-996,58	-1012,25



28	29	30	31	32	33	34
259068,24	259068,24	259068,24	259068,24	259068,24	259068,24	259068,24
53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
13,97	13,97	13,97	13,97	13,97	13,97	13,97
9,05	9,05	9,05	9,05	9,05	9,05	9,05
80,47	80,47	80,47	80,47	80,47	80,47	80,47
89,52	89,52	89,52	89,52	89,52	89,52	89,52
-75,55	-75,55	-75,55	-75,55	-75,55	-75,55	-75,55
1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38
-76,93	-76,93	-76,93	-76,93	-76,93	-76,93	-76,93
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-76,93	-76,93	-76,93	-76,93	-76,93	-76,93	-76,93
-75,55	-75,55	-75,55	-75,55	-75,55	-75,55	-75,55
-2040,18	-2115,73	-2191,29	-2266,84	-2342,39	-2417,94	-2493,50
-14,78	-13,94	-13,15	-12,41	-11,71	-11,04	-10,42
-1027,03	-1040,98	-1054,13	-1066,54	-1078,25	-1089,29	-1099,71



35	36	37	38	39	40	41
259068,24	259068,24	259068,24	259068,24	259068,24	259068,24	259068,24
53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
13,97	13,97	13,97	13,97	13,97	13,97	13,97
9,05	9,05	9,05	9,05	9,05	9,05	9,05
80,47	80,47	80,47	80,47	80,47	80,47	80,47
89,52	89,52	89,52	89,52	89,52	89,52	89,52
-75,55	-75,55	-75,55	-75,55	-75,55	-75,55	-75,55
1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38
-76,93	-76,93	-76,93	-76,93	-76,93	-76,93	-76,93
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-76,93	-76,93	-76,93	-76,93	-76,93	-76,93	-76,93
-75,55	-75,55	-75,55	-75,55	-75,55	-75,55	-75,55
-2569,05	-2644,60	-2720,15	-2795,71	-2871,26	-2946,81	-3022,37
-9,83	-9,27	-8,75	-8,25	-7,79	-7,35	-6,93
-1109,54	-1118,82	-1127,56	-1135,82	-1143,60	-1150,95	-1157,88

2. Ciclo Brayton Simple: Escenario 2

Año	0	1	2	3	4	5	6
Ingresos							
Energía generada [MWh]							
Precio energía [€/MWh]							
Ingresos totales [M€]							
Gastos							
Inversión [M€]	37,52	37,52	37,52	37,52	37,52	37,52	37,52
Gastos O&M [M€]							
Gastos CO ₂ [M€]							
Gastos totales [M€]	37,52	37,52	37,52	37,52	37,52	37,52	37,52
EBITDA [M€]							
Amortización [M€]							
EBIT							
Impuestos [M€]							
BDI [M€]							
Flujo de caja [M€]	-37,52	-37,52	-37,52	-37,52	-37,52	-37,52	-37,52
Flujo de caja acumulado [M€]	-37,52	-75,05	-112,57	-150,10	-187,62	-225,15	-262,67
Flujo de caja actualizado [M€]	-37,52	-35,40	-33,40	-31,51	-29,72	-28,04	-26,45
VAN [M€]	-37,52	-72,92	-106,32	-137,83	-167,55	-195,59	-222,04
TIR [%]	-1,23						



7	8	9	10	11	12	13
536821,56	536821,56	536821,56	536821,56	536821,56	536821,56	536821,56
53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
28,95	28,95	28,95	28,95	28,95	28,95	28,95
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
15,72	15,72	15,72	15,72	15,72	15,72	15,72
1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74
5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25
10,22	10,22	10,22	10,22	10,22	10,22	10,22
-252,45	-242,23	-232,01	-221,78	-211,56	-201,34	-191,12
6,80	6,41	6,05	5,71	5,38	5,08	4,79
-215,25	-208,83	-202,78	-197,07	-191,69	-186,61	-181,82



14	15	16	17	18	19	20
536821,56	536821,56	536821,56	536821,56	536821,56	536821,56	536821,56
53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
28,95	28,95	28,95	28,95	28,95	28,95	28,95
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
15,72	15,72	15,72	15,72	15,72	15,72	15,72
1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74
5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25
10,22	10,22	10,22	10,22	10,22	10,22	10,22
-180,90	-170,68	-160,46	-150,23	-140,01	-129,79	-119,57
4,52	4,27	4,02	3,80	3,58	3,38	3,19
-177,30	-173,03	-169,01	-165,21	-161,63	-158,25	-155,07



21	22	23	24	25	26	27
536821,56	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48
53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
28,95	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
15,72	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76
1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
13,74	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79
5,50	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
8,25	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
10,22	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05
-109,35	-106,30	-103,25	-100,20	-97,15	-94,10	-91,05
3,01	0,85	0,80	0,75	0,71	0,67	0,63
-152,06	-151,21	-150,42	-149,66	-148,95	-148,28	-147,65



28	29	30	31	32	33	34
315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48
53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
3,76	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76
1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79
0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
3,05	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05
-88,01	-84,96	-81,91	-78,86	-75,81	-72,76	-69,71
0,60	0,56	0,53	0,50	0,47	0,45	0,42
-147,05	-146,49	-145,96	-145,46	-144,99	-144,54	-144,12



35	36	37	38	39	40	41
315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48
53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
3,76	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76
1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79
0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
3,05	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05
-66,66	-63,61	-60,56	-57,52	-54,47	-51,42	-48,37
0,40	0,37	0,35	0,33	0,31	0,30	0,28
-143,72	-143,35	-143,00	-142,66	-142,35	-142,05	-141,77

3. Ciclo Brayton con Regeneración: Escenario 1

Año	0	1	2	3	4	5	6
Ingresos							
Energía generada [MWh]							
Precio energía [€/MWh]							
Ingresos totales [M€]							
Gastos							
Inversión [M€]	81,27	81,27	81,27	81,27	81,27	81,27	81,27
Gastos O&M [M€]							
Gastos CO ₂ [M€]							
Gastos totales [M€]	81,27	81,27	81,27	81,27	81,27	81,27	81,27
EBITDA [M€]							
Amortización [M€]							
EBIT							
Impuestos [M€]							
BDI [M€]							
Flujo de caja [M€]	-81,27	-81,27	-81,27	-81,27	-81,27	-81,27	-81,27
Flujo de caja acumulado [M€]	-81,27	-162,53	-243,80	-325,07	-406,33	-487,60	-568,87
Flujo de caja actualizado [M€]	-81,27	-76,67	-72,33	-68,23	-64,37	-60,73	-57,29
VAN [M€]	-81,27	-157,93	-230,26	-298,49	-362,86	-423,59	-480,88
TIR [%]	-205,31						

7	8	9	10	11	12	13
536821,56	536821,56	536821,56	536821,56	536821,56	536821,56	536821,56
53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
28,95	28,95	28,95	28,95	28,95	28,95	28,95
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
109,56	109,56	109,56	109,56	109,56	109,56	109,56
122,79	122,79	122,79	122,79	122,79	122,79	122,79
-93,84	-93,84	-93,84	-93,84	-93,84	-93,84	-93,84
1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
-95,82	-95,82	-95,82	-95,82	-95,82	-95,82	-95,82
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-95,82	-95,82	-95,82	-95,82	-95,82	-95,82	-95,82
-93,84	-93,84	-93,84	-93,84	-93,84	-93,84	-93,84
-662,71	-756,55	-850,40	-944,24	-1038,08	-1131,93	-1225,77
-62,41	-58,88	-55,55	-52,40	-49,44	-46,64	-44,00
-543,29	-602,17	-657,72	-710,12	-759,55	-806,19	-850,19

14	15	16	17	18	19	20
536821,56	536821,56	536821,56	536821,56	536821,56	536821,56	536821,56
53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
28,95	28,95	28,95	28,95	28,95	28,95	28,95
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
109,56	109,56	109,56	109,56	109,56	109,56	109,56
122,79	122,79	122,79	122,79	122,79	122,79	122,79
-93,84	-93,84	-93,84	-93,84	-93,84	-93,84	-93,84
1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
-95,82	-95,82	-95,82	-95,82	-95,82	-95,82	-95,82
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-95,82	-95,82	-95,82	-95,82	-95,82	-95,82	-95,82
-93,84	-93,84	-93,84	-93,84	-93,84	-93,84	-93,84
-1319,61	-1413,46	-1507,30	-1601,14	-1694,99	-1788,83	-1882,67
-41,51	-39,16	-36,94	-34,85	-32,88	-31,02	-29,26
-891,70	-930,85	-967,79	-1002,64	-1035,52	-1066,54	-1095,80

21	22	23	24	25	26	27
536821,56	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48
53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
28,95	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
109,56	97,88	97,88	97,88	97,88	97,88	97,88
122,79	111,10	111,10	111,10	111,10	111,10	111,10
-93,84	-94,11	-94,11	-94,11	-94,11	-94,11	-94,11
1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
-95,82	-96,09	-96,09	-96,09	-96,09	-96,09	-96,09
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-95,82	-96,09	-96,09	-96,09	-96,09	-96,09	-96,09
-93,84	-94,11	-94,11	-94,11	-94,11	-94,11	-94,11
-1976,52	-2070,63	-2164,74	-2258,86	-2352,97	-2447,08	-2541,20
-27,60	-26,12	-24,64	-23,24	-21,93	-20,69	-19,52
-1123,40	-1149,52	-1174,16	-1197,40	-1219,33	-1240,02	-1259,53

28	29	30	31	32	33	34
315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48
53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
97,88	97,88	97,88	97,88	97,88	97,88	97,88
111,10	111,10	111,10	111,10	111,10	111,10	111,10
-94,11	-94,11	-94,11	-94,11	-94,11	-94,11	-94,11
1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
-96,09	-96,09	-96,09	-96,09	-96,09	-96,09	-96,09
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-96,09	-96,09	-96,09	-96,09	-96,09	-96,09	-96,09
-94,11	-94,11	-94,11	-94,11	-94,11	-94,11	-94,11
-2635,31	-2729,43	-2823,54	-2917,65	-3011,77	-3105,88	-3199,99
-18,41	-17,37	-16,39	-15,46	-14,58	-13,76	-12,98
-1277,95	-1295,32	-1311,70	-1327,16	-1341,74	-1355,50	-1368,48

35	36	37	38	39	40	41
315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48
53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
97,88	97,88	97,88	97,88	97,88	97,88	97,88
111,10	111,10	111,10	111,10	111,10	111,10	111,10
-94,11	-94,11	-94,11	-94,11	-94,11	-94,11	-94,11
1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
-96,09	-96,09	-96,09	-96,09	-96,09	-96,09	-96,09
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-96,09	-96,09	-96,09	-96,09	-96,09	-96,09	-96,09
-94,11	-94,11	-94,11	-94,11	-94,11	-94,11	-94,11
-3294,11	-3388,22	-3482,33	-3576,45	-3670,56	-3764,67	-3858,79
-12,24	-11,55	-10,90	-10,28	-9,70	-9,15	-8,63
-1380,73	-1392,28	-1403,18	-1413,46	-1423,16	-1432,31	-1440,94

4. Ciclo Brayton con Regeneración: Escenario 2

Año	0	1	2	3	4	5	6
Ingresos							
Energía generada [MWh]							
Precio energía [€/MWh]							
Ingresos totales [M€]							
Gastos							
Inversión [M€]	37,52	37,52	37,52	37,52	37,52	37,52	37,52
Gastos O&M [M€]							
Gastos CO ₂ [M€]							
Gastos totales [M€]	37,52	37,52	37,52	37,52	37,52	37,52	37,52
EBITDA [M€]							
Amortización [M€]							
EBIT							
Impuestos [M€]							
BDI [M€]							
Flujo de caja [M€]	-37,52	-37,52	-37,52	-37,52	-37,52	-37,52	-37,52
Flujo de caja acumulado [M€]	-37,52	-75,05	-112,57	-150,10	-187,62	-225,15	-262,67
Flujo de caja actualizado [M€]	-37,52	-35,40	-33,40	-31,51	-29,72	-28,04	-26,45
VAN [M€]	-37,52	-72,92	-106,32	-137,83	-167,55	-195,59	-222,04
TIR [%]	-1,23						



7	8	9	10	11	12	13
536821,56	536821,56	536821,56	536821,56	536821,56	536821,56	536821,56
53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
28,95	28,95	28,95	28,95	28,95	28,95	28,95
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
15,72	15,72	15,72	15,72	15,72	15,72	15,72
1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74
5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25
10,22	10,22	10,22	10,22	10,22	10,22	10,22
-252,45	-242,23	-232,01	-221,78	-211,56	-201,34	-191,12
6,80	6,41	6,05	5,71	5,38	5,08	4,79
-215,25	-208,83	-202,78	-197,07	-191,69	-186,61	-181,82

14	15	16	17	18	19	20
536821,56	536821,56	536821,56	536821,56	536821,56	536821,56	536821,56
53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
28,95	28,95	28,95	28,95	28,95	28,95	28,95
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
15,72	15,72	15,72	15,72	15,72	15,72	15,72
1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74
5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25
10,22	10,22	10,22	10,22	10,22	10,22	10,22
-180,90	-170,68	-160,46	-150,23	-140,01	-129,79	-119,57
4,52	4,27	4,02	3,80	3,58	3,38	3,19
-177,30	-173,03	-169,01	-165,21	-161,63	-158,25	-155,07

21	22	23	24	25	26	27
536821,56	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48
53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
28,95	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
15,72	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76
1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
13,74	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79
5,50	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
8,25	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
10,22	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05
-109,35	-106,30	-103,25	-100,20	-97,15	-94,10	-91,05
3,01	0,85	0,80	0,75	0,71	0,67	0,63
-152,06	-151,21	-150,42	-149,66	-148,95	-148,28	-147,65

28	29	30	31	32	33	34
315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48
53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
3,76	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76
1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79
0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
3,05	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05
-88,01	-84,96	-81,91	-78,86	-75,81	-72,76	-69,71
0,60	0,56	0,53	0,50	0,47	0,45	0,42
-147,05	-146,49	-145,96	-145,46	-144,99	-144,54	-144,12

35	36	37	38	39	40	41
315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48	315123,48
53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
3,76	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76
1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79
0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
3,05	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05
-66,66	-63,61	-60,56	-57,52	-54,47	-51,42	-48,37
0,40	0,37	0,35	0,33	0,31	0,30	0,28
-143,72	-143,35	-143,00	-142,66	-142,35	-142,05	-141,77